

PERANCANGAN *MODEL PREDICTIVE CONTROL* (MPC) UNTUK PENGENDALIAN TEMPERATUR PADA *ANNEALING LEHR*

TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Prodi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi



Oleh :

ERRYNI CHANTIKA PERMATA

11750525088

PRODI TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU

PEKANBARU

2021

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



LEMBAR PERSETUJUAN

PERANCANGAN *MODEL PREDICTIVE CONTROL* (MPC) UNTUK PENGENDALIAN TEMPERATUR PADA *ANNEALING LEHR*

TUGAS AKHIR

oleh:

ERRYNI CHANTIKA PERMATA

11750525088

Telah diperiksa dan disetujui sebagai laporan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro
di Pekanbaru, pada tanggal 25 Juni 2021

Ketua Program Studi

Teknik Elektro

Digitally signed
by Ewi
Ismaredah
Tanggal:
2021.07.21
08:48:23 WIB

Ewi Ismaredah S.Kom., M.Kom

NIP. 19750922 200912 2 002

Pembimbing I

Digitally
signed by
Halim
Mudia

Halim Mudia, ST., MT

NIP. 13051 7053

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang memurnikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC) UNTUK PENGENDALIAN TEMPERATUR PADA ANNEALING LEHR

TUGAS AKHIR

oleh:

ERRYNI CHANTIKA PERMATA

11750525088

Telah dipertahankan di depan Sidang Dewan Penguji
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
di Pekanbaru, pada tanggal

Pekanbaru, 25 Juni 2021

Mengesahkan,



Dr. Hartono, M.Pd

NIP. 19640301 199203 1 003

DEWAN PENGUJI :

Ketua : Arif Marsal, Lc., M.A

Sekretaris : Halim Mudia, ST., MT

Anggota I : Jufrizel, ST., MT

Anggota II : Aulia Ullah, S.T., M.Eng

Ketua Program Studi

Teknik Elektro

Digitally
signed by Ewi
Ismaredah
Tanggal:
2021.07.21
08:47:58 WIB

Ewi Ismaredah S.Kom., M.Kom

NIP. 19750922 200912 2 002

Digitally signed
by Arif Marsal
Tanggal:
2021.07.19
13:11:18 WIB

Digitally signed
by Halim Mudia

Digitally signed
by Aulia Ullah
Tanggal: 16 Juli
2021

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa di dalam Tugas Akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan oleh saya maupun orang lain untuk keperluan lain, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak memuat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali disebutkan dalam referensi dan di dalam daftar pustaka.

Pekanbaru, 25 Juni 2021

Yang membuat pernyataan,



Erryni Chantika Permata

117505225088

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL

Tugas akhir yang tidak diterbitkan ini terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau adalah terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta pada penulis. Referensi kepustakaan di perkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau ringkasan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai dengan kebiasaan ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

Penggandaan atau penerbitan sebagian atau seluruh Tugas Akhir ini harus memperoleh izin dari Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau. Perpustakaan yang meminjamkan Tugas Akhir ini untuk anggotanya diharapkan untuk mengisi nama, tanda peminjaman dan tanggal pinjam.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



UIN SUSKA RIAU

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan menyebut nama Allah yang maha pengasih lagi maha penyayang
Barang siapa yang menghendaki kehidupan dunia, maka wajib baginya berilmu, dan barang siapa yang menghendaki kehidupan akhirat, maka wajib baginya berilmu, dan barang siapa yang menghendaki keduanya, maka wajib baginya berilmu.

(HR. Tirmidzi)

Terima Kasih Ya Allah...

Sembah sujud serta syukurku kepada-Mu ya Allah, zat yang Maha Pengasih namun tak pernah pilih kasih dan Maha Penyayang yang kasih sayang-Nya tak terbilang. Engkau zat yang Maha membolak-balikkan hati, teguhkanlah hati ini di atas agama-Mu ya Allah. Lantunan sholawat beriring salam penggugah hati dan jiwa, menjadi persembahan penuh kerinduan pada sosok panutan umat, pembangun peradaban manusia yang beradab Nabi Besar Muhammad SAW.

Niscaya Allah akan mengangkat (derajat) orang-orang yang beriman diantaramu dan orang-orang yang diberi ilmu beberapa derajat.

(QS: Al-Mujadilah 11)

Ku persembahkan karya ini untuk Papa tercinta, sosok pejuang dalam hidupku yang tak pernah mengenal kata lelah apalagi mengeluh serta Mama tersayang, malaikat tanpa sayap dalam hidupku yang tak kenal waktu siang dan malam selalu menjaga dan melindungi hingga aku bisa sampai seperti sekarang ini, Kakak tercinta, seluruh keluarga serta sahabat dan seluruh keluarga besar teknik elektro UIN SUSKA RIAU yang doanya senantiasa mengiringi setiap langkahku dalam meniti kesuksesan.

Dan katakanlah: "Ya Tuhan-ku, masukkan aku ketempat masuk yang benar dan keluarkanlah (pula) aku ketempat keluar yang benar dan berilah aku disisi-Mu kekuasaan yang dapat menolongku."

(QS: Al-Isra 80)

/ Erryni Chantika Permata |

| 25 Juni 2021 |

PERANCANGAN *MODEL PREDICTIVE CONTROL* (MPC) UNTUK PENGENDALIAN TEMPERATUR PADA *ANNEALING LEHR*

ERRYNI CHANTIKA PERMATA

NIM : 11750525088

Tanggal Sidang : 25 Juni 2021

Program Studi Teknik Elektro Teknik Elektro

Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau

Jl. Soebrantas No. 155 Pekanbaru

ABSTRAK

Pada pembuatan kaca kegagalan bisa terjadi saat proses penurunan temperatur kaca, dimana kaca tidak dapat langsung berada di suhu lingkungan karena suhu kaca harus diturunkan secara bertahap. Oleh karena itu diperlukan suatu pengendali temperatur agar dapat mengatasi permasalahan pada zona *dwell* yaitu *error stedy state* yang tinggi. Kendali yang digunakan adalah *Model Predictive Control* (MPC), dimana pengendali ini memiliki objektif kontrol untuk meminimalkan *error* yang terjadi antara nilai *ouput* yang terprediksi dengan *set point* yang dimasukkan. Dengan demikian pengendali ini dapat mengikuti perubahan *set point* yang diberikan, dapat mengatasi *error steady state* dan terjadinya penurunan pada *rise time*.

Kata Kunci : *Annealing Lehr, Model Predictive Control* (MPC)

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

UIN SUSKA RIAU

MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC) DESIGN FOR TEMPERATURE CONTROL IN ANNEALING LEHR

ERRYNI CHANTIKA PERMATA

Student Number : 11750525088

Date of Final Exam : Juny 25th, 2021

Department of Electrical Engineering

Faculty of Science of Technology

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Soebrantas St. Number. 155 Pekanbaru

ABSTRACT

In the manufacture of glass, failure can occur during the process of decreasing the temperature of the glass, where the glass cannot be directly at the ambient temperature because the temperature of the glass must be lowered gradually. Therefore we need a temperature controller in order to overcome the problem in the residential zone, namely a high steady state error. The control used is Model Predictive Control (MPC), where this controller has a control objective to minimize errors that occur between the predicted output value and the input set point. Thus the controller can follow changes in the given set point, can overcome the steady state error and the occurrence of a decrease in the rise time.

Key Word : Annealing Lehr, Model Predictive Control (MPC)

UIN SUSKA RIAU

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr.Wb

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT, yang telah mencurahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Shalawat dan salam juga penulis haturkan kepada baginda Rasulullah SAW, sebagai seorang sosok pemimpin dan suri tauladan bagi seluruh umat di dunia yang patut di contoh dan di teladani bagi kita semua. Atas ridho Allah SWT penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul *“Perancangan Model Predictive Control (MPC) Untuk Pengendalian Temperatur Pada Annealing Lehr”*.

Melalui proses bimbingan dan pengarahan yang disumbangkan oleh orang-orang yang berpengetahuan, dorongan, motivasi, dan juga do'a orang-orang yang ada disekeliling penulis sehingga penulisan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan penuh kesederhanaan. Sudah menjadi ketentuan bagi setiap Mahasiswa yang ingin menyelesaikan studinya pada perguruan tinggi UIN SUSKA Riau harus membuat karya ilmiah berupa Tugas Akhir guna mencapai gelar sarjana.

Oleh sebab itu sudah sewajarnya penulis menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Diri sendiri yang sudah berjuang dan tidak menyerah.
2. Papa, Mama, dan Kakak tercinta yang telah memberikan semangat, dukungan moril maupun materil dan doa kepada penulis serta keluarga besar penulis yang selalu mendoakan penulis.
3. Bapak Prof. Dr. Hairunnas Rajab, M.Ag. selaku Rektor UIN SUSKA Riau beserta kepada seluruh staf dan jajarannya.
4. Bapak Dr. Hartono, M.Pd. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN SUSKA Riau beserta kepada seluruh Pembantu Dekan, Staf dan jajarannya.
5. Ibu Ewi Ismaredah, S.Kom., M.Kom selaku ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi UIN SUSKA Riau.
6. Bapak Mulyono, ST., MT selaku sekretaris Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi UIN SUSKA Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Bapak Halim Mudia, ST., MT selaku dosen Pembimbing Tugas Akhir dan dosen Pembimbing Akademik selama perkuliahan penulis dari semester 1 hingga akhir semester yang telah banyak meluangkan waktu serta pemikirannya dengan ikhlas dalam memberikan penjelasan dan masukan yang sangat berguna sehingga penulis menjadi lebih mengerti dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

8. Bapak Aulia Ullah, S.T., M.Eng selaku dosen pengampu mata kuliah Tugas Akhir 1 yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi kritikan dan saran yang sangat membangun terhadap penulis.

9. Bapak Arif Marsal, Lc., M.A selaku dosen ketua sidang yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi kritikan dan saran yang sangat membangun terhadap penulis.

10. Bapak Jufrizel, ST., MT dan Bapak Aulia Ullah, S.T M.Eng selaku dosen penguji yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi kritikan dan saran yang sangat membangun terhadap penulis.

11. Bapak dan Ibu dosen Program Studi Teknik Elektro yang telah memberikan bimbingan dan curahan ilmu kepada penulis sehingga bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.

12. Juliesty Huswina Nasution selaku teman seperjuangan dalam mengerjakan Tugas Akhir ini dan telah banyak membantu penulis dalam berbagai hal dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Sahabat (Nadia Aspa, Mutiara Purnama Sari, dan Dewi Pratiwi) calon S.T yang telah memberikan dukungan, dorongan, dan motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Calon S.T Yogy Dwi Pranata, Swastika Pusparani, Alfian Fatiwa dan Rayhan Pratama Asri yang selalu mengingatkan, berdiskusi dan memberi saran kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Kelas D (DEWA'17), Dunsanak dan Instrumen 2017 serta teman-teman angkatan 2017 lainnya yang juga telah memberikan banyak dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini serta teman-teman penulis lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu dan memberi dorongan, motivasi dan sumbangan pemikiran dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Semoga bantuan yang telah diberikan baik moril maupun materil mendapat balasan yang baik dari Allah SWT, dan sebuah harapan dari penulis semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan para pembaca semua pada umumnya.

Semua kekurangan hanya datang dari penulis dan kesempurnaan hanya milik Allah SWT, hal ini yang membuat penulis menyadari bahwa dalam pembuatan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan karena keterbatasan kemampuan, pengalaman, dan pengetahuan penulis. Untuk itu penulis mengharap kritik dan saran dari semua pihak yang bersifat positif dan membangun demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Pekanbaru, 25 Juni 2021

Penulis,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Erryni", is placed above the printed name.

Erryni Chantika Permata

NIM. 11750525088

UIN SUSKA RIAU

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN	Error! Bookmark not defined.
LEMBAR PENGESAHAN.....	Error! Bookmark not defined.
LEMBAR PERNYATAAN.....	i
LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL	ii
PALAMAN PERSEMBAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	i
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL.....	v
DAFTAR RUMUS.....	vi
DAFTAR LAMBANG.....	viii
DAFTAR SINGKATAN	ix
BAB I LATAR BELAKANG	I-1
1.1 Latar Belakang	I-1
1.2 Rumusan Masalah	I-4
1.3 Tujuan Penelitian.....	I-5
1.4 Batasan Masalah.....	I-5
1.5 Manfaat Penelitian.....	I-5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	II-1
2.1 Penelitian Terkait	II-1
2.2 Landasan Teori	II-3
2.2.1 <i>Annealing Lehr</i>	II-3
2.2.2 Permodelan <i>Annealing Lehr</i>	II-5
2.3 Sistem Kendali	II-7
2.3.1 Sistem Orde 2	II-8

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2.4	Transformasi Bilinear dan <i>Theorema Shannon</i>	II-10
2.5	<i>Model Predictive Control (MPC)</i>	II-10
2.5.1	<i>Model State Space</i>	II-12
2.5.2	<i>Controllable Cannonical Form</i>	II-13
2.5.3	Desain <i>Augmented Model</i>	II-13
2.5.3	<i>State</i> Prediksi dan Variabel <i>Output</i>	II-13
2.5.4	Indeks Performansi <i>Model Predictive Control (MPC)</i>	II-14
2.6	Program Matlab.....	II-15

BAB III METODE PENELITIAN..... III-1

3.1	<i>Flowchart</i> Metode Penelitian	III-1
3.2	Tahapan Penelitian	III-2
3.3	Pengumpulan Data	III-3
3.4	Pemodelan Matematis <i>Annealing Lehr</i>	III-3
3.5	Validasi Pemodelan <i>Plant Annealing Lehr</i>	III-4
3.6	Perancangan Pengendali <i>Model Predictive Control (MPC)</i>	III-5
3.6.1	Menentukan Respon <i>Transient</i> dari Sistem Berdasarkan Hasil <i>Open Loop</i> ..	III-6
3.6.2	Perubahan <i>Transfer Function</i> ke Bentuk <i>Model State Space</i>	III-7
3.6.3	<i>Controllable Cannonical Form</i>	III-9
3.6.4	Desain <i>Augmented Model</i>	III-10
3.6.5	<i>State</i> Prediksi dan Variabel <i>Output Model Predictive Control (MPC)</i>	III-11
3.6.6	Indeks Performansi <i>Model Predictive Control (MPC)</i>	III-12
3.7	Skenario Penelitian.....	III-13
3.8	Perancangan Simulasi.....	III-13

BAB IV HASIL DAN ANALISA IV-Error! Bookmark not defined.

4.1	Gambaran Umum Pengujian	IV-Error! Bookmark not defined.
4.2	Hasil Pengujian dan Analisa Simulasi <i>Annealing Lehr</i> Secara <i>Open Loop</i> ...	IV-Error! Bookmark not defined.
4.3	Analisa Kendali <i>Model Predictive Control (MPC)</i> pada <i>Annealing Lehr</i>	IV-Error! Bookmark not defined.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- 4.3.1 Analisa Respon *Model Predictive Control* (MPC) pada *Set Point* 550⁰C IV-
Error! Bookmark not defined.
- 4.3.2 Analisa Respon *Model Predictive Control* (MPC) pada *Set Point* 250⁰C IV-
Error! Bookmark not defined.
- 4.3.3 Analisa Respon *Model Predictive Control* (MPC) dengan perubahan *Set Point* dari 550⁰C ke 250⁰C..... IV-**Error! Bookmark not defined.**

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN V-Error! Bookmark not defined.

- 1.1 Kesimpulan..... **V-Error! Bookmark not defined.**
- 5.2 Saran..... **V-Error! Bookmark not defined.**

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2. 1 Prinsip Kerja Lehr untuk Proses <i>Heating</i>	II-5
Gambar 2. 2 Diagram Blok pada Proses <i>Heating</i>	II-5
Gambar 2. 3 <i>Insulation</i> pada Dinding <i>Lehr</i>	II-6
Gambar 2. 4 Karakteristik Respon Waktu Sistem Orde 2	II-9
Gambar 2. 5 Konsep Dasar <i>Model Predictive Control</i> (MPC)	II-11
Gambar 2. 6 Matlab R2015a	II-16
Gambar 2. 7 Tampilan Model Simulink pada Matlab	II-16
Gambar 2. 8 Kotak Dialog Simulink Library	II-17
Gambar 3. 1 <i>Flowchart</i> Penelitian	III-1
Gambar 3. 2 Blok <i>Simulink</i> Digram <i>Open Loop Annealing Lehr</i>	III-4
Gambar 3. 3 Respon <i>Open Loop</i> Temperatur pada <i>Annealing</i>	III-5
Gambar 3. 4 Rangkaian <i>Simulink</i> Sistem Pengendali <i>Model Predictive Control</i> (MPC)	III-13
Gambar 4. 1 Blok <i>Simulink Annealing Lehr</i> Secara <i>Open Loop</i>	IV-Error! Bookmark not defined.
Gambar 4. 2 Hasil Respon <i>Annealing Lehr</i> Secara <i>Open Loop</i>	IV-Error! Bookmark not defined.
Gambar 4. 3 Respon <i>Output Model Predictive Control</i> (MPC) dengan <i>Set Point</i> 550 ⁰ C	IV-Error! Bookmark not defined.
Gambar 4. 4 Respon <i>Output Model Predictive Control</i> (MPC) dengan <i>Set Point</i> 250 ⁰ C	IV-Error! Bookmark not defined.
Gambar 4. 5 Respon <i>Output</i> Kendali <i>Model Predictive Control</i> (MPC) pada <i>Annealing Lehr</i> dalam Mengatasi Perubahan <i>Set Point</i>	IV-Error! Bookmark not defined.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 3.1 Parameter <i>Annealing</i>	III-3

UIN SUSKA RIAU

DAFTAR RUMUS

- 2.1 Pemodelan *Control Valve*
- 2.2 *Gain Control Valve*
- 2.3 Resistansi Dinding
- 2.4 C_T Elemen *Room*
- 2.5 *Transfer Function*
- 2.6 Sistem Orde 2
- 2.7 *Overshoot Maksimum*
- 2.8 Asumsi *Plant Single Input Single Output*
- 2.9 Rumus *Plant*
- 2.10 Persamaan *State Space*
- 2.11 Input Model *State Space* $\Delta u(k)$
- 2.12 *Design Augmented Model*
- 2.13 Variabel *State* yang akan Datang
- 2.14 Nilai *Output* yang Terprediksi
- 2.15 Sinyal Referensi dari Sinyal *Set Point*
- 2.16 Refleksi Objektif Kontrol
- 2.17 Solusi Optimal Kontrol
- 3.1 *Transfer Function Annealing Lehr*
- 3.2 *State Space Continue*
- 3.3 *State Space* Keadaan x
- 3.4 *State Space* untuk Matriks A
- 3.5 *State Space* untuk Matriks B
- 3.6 *State Space* untuk Matriks C

DAFTAR LAMBANG

K	$Gain\ overall$
τ	Konstanta waktu
ω_n	Frekuensi alami tak teredam
ζ	Rasio peredaman
Δu	= Operasi delta
F	= Matriks <i>output</i>
ϕ	= Matriks <i>output</i>
J	= Refleksi objektif kontrol
\bar{R}	= Matriks diagonal yang tersusun dari beberapa matriks lain

UIN SUSKA RIAU

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR SINGKATAN

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim I

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

MPC

Model Predictive Control

t_s

Time Sampling

t_d

Time Delay

t_r

Rise Time

t_s

Time Settling

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

UIN SUSKA RIAU

BAB I

PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Seiring berjalannya waktu perkembangan pada bidang industri semakin pesat salah satunya adalah industri kaca yang menjadi alat pendukung teknologi[1]. Indonesia memproduksi kaca 1.432.750 ton/tahun yang menjadikan Indonesia sebagai negara pertama di ASEAN untuk produsen kaca lembaran terbesar[2]. Keberadaan kaca sebagai bahan bangunan telah dikenal dan digunakan sejak dibutuhkannya bidang transparan yang mampu menyatukan ruang luar dengan ruang dalam serta memasukan unsur pencahayaan alami namun tetap menjaga kondisi ruang dalam dari pengaruh ruang luar[3]. Kaca lembaran biasanya digunakan untuk dekorasi rumah, industri otomotif dan lainnya[4]. Semakin pesatnya perkembangan pada industri kaca dan kebutuhan akan kaca lembaran juga semakin tinggi, maka dalam proses memproduksi kaca lembaran kualitas dan mutunya harus dijaga.

Pengendalian kualitas produk dalam proses industri kaca lembaran perlu dilakukan guna mendeteksi kesalahan secara tepat, sehingga bisa dilakukan tindakan antisipasinya[5]. Kualitas produksi yang diharapkan yaitu kaca lembaran memiliki permukaan yang lembut, licin[6] dan rata serta tidak adanya distorsi atau gelombang pada kaca[7]. Tetapi dari hasil studi literatur, sering terjadinya kerusakan pada kaca lembaran adalah seperti adanya gelembung, kelengkungan dan keretakan[7] yang menyebabkan kegagalan sehingga kaca lembaran harus didaur ulang dan menambah biaya produksi[1]. Kegagalan bisa terjadi saat proses penurunan temperatur kaca, dimana kaca lembaran tidak dapat langsung berada di temperatur lingkungan karena temperatur kaca harus diturunkan secara bertahap[7]. Proses penurunan temperatur ini disebut dengan *Annealing*[8].

Annealing Lehr terdiri dari kata *annealing* dari sebuah bahasa peristilahan atau *glossary* yang artinya pelunakan dan penurunan temperatur[9]. Yang mana proses tersebut dilakukan di tempat pembakaran dan pendinginan atau yang dikenal dengan *lehr*[8]. Jadi, *annealing lehr* yaitu proses perlakuan panas yang dilakukan pada kaca lembaran sampai suhu tertentu (*heating*) lalu menahannya dalam beberapa waktu dan didinginkan (*cooling*) secara bertahap untuk menghilangkan tekanan internal yang mana nama tempat pengaturan temperatur untuk

mendinginkan kaca disebut *lehr*[8]. Beberapa istilah dalam *annealing* yaitu *rapid reheating* yaitu zona pemanasan kaca secara cepat dimana temperatur pada saat *heating zone* berada di 600°C sampai 490°C , *dwell* yaitu penahanan dan pemerataan temperatur di permukaan bidang kaca yang temperturnya berada pada 430°C sampai 80°C lalu *slow cooling* yaitu *cooling zone* dengan penurunan temperatur kaca secara perlahan yang mempunyai rentang temperatur 70°C sampai 60°C [3][8][10]. Pengendalian temperatur *annealing* yang tepat akan menghasilkan produk yang bagus dan berkualitas. Pengendalian temperatur menjadi hal yang paling penting. Parameter yang harus diperhatikan adalah kestabilan dalam sistemnya[7]. Kestabilan pada proses ini yaitu temperatur yang dihasilkan untuk mendinginkan kaca memiliki pergerakan nilai yang stabil sama dengan *setpoint* yang diharapkan[7]. Ketidakstabilan merupakan keadaan yang sangat merugikan bagi sistem pengendalian *close loop*[7].

Agar kaca yang diproduksi tidak pecah saat terjadi proses *annealing* maka dibutuhkan pengendali untuk menjaga temperturnya agar tetap dalam *set point* yang diinginkan[7]. Penelitian mengenai *annealing lehr* secara *open loop* telah dilakukan oleh penulis dengan cara simulasi menggunakan aplikasi *Matlab* yang menunjukkan bahwa pada saat proses *rapid reheating* memiliki *rise time* yang cukup lama lalu pada saat proses *dwell* masih mengalami *error steady state* dan memiliki respon *output* sistem yang jauh dari nilai *setpoint*. Yaitu diberikan perubahan *set point* 550°C menjadi 250°C mempunyai *error steady state* sebesar 1.661×10^6 $^{\circ}\text{C}$.

Selanjutnya beberapa penelitian mengenai *Annealing* menggunakan *close loop* adalah pengendali yang menggunakan PID pada proses pembuatan kaca lembaran di PT. Asahimas Flat Glass, Tbk Sidoarjo untuk pengaturan temperatur. Penelitian ini membuktikan bahwa kondisi kestabilan tercapai. Tetapi malah terdapat *overshoot* sebesar $\pm 12\%$ yang seharusnya tidak terjadi *overshoot* pada saat pengujian *open loop* dan lambat dalam mencapai *setpoint*[7].

Penelitian lain yang membahas kendali LQR menunjukkan hasil respon waktu yang cukup baik, dengan *settling time* 6,4 detik, *rise time* 2,8 detik, tetapi masih mempunyai *error steady state* lebih dari 5%[9]. Dari hasil penelitian ini membuktikan bahwa pengendali belum mampu menyelesaikan permasalahan yaitu masih terdapatnya *error steady state*. Penelitian lain juga dilakukan menggunakan pengendali LQR-PID, dimana penelitian ini dapat mencapai *setpoint* dengan respon waktu yang lebih baik dari pengendali LQR saja yaitu dengan *rise time* 0,1823 detik, dan *error steady state* dari $0,5^{\circ}\text{C}$ menjadi $0,011^{\circ}\text{C}$ pada *setpoint* 450°C [4].

tetapi hasil dari penelitian yang menggunakan pengendali LQR-PID ini masih terdapat *error steady state*.

Penelitian yang menggunakan pengendali PID dan PID fuzzy pada *annealing*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *overshoot* rata-rata adalah 2,12%, *rise time* 45 detik dan *settling time* 180 detik dengan *controller* PID fuzzy sedangkan *overshoot* 16,13%, *rise time* 44 detik dan waktu penyelesaian adalah 290 detik menggunakan PID[11]. Sama dengan pengendali PID bahwa sistem ini hanya memiliki masalah pada *error steady state* tetapi malah ada masalah baru yang ditimbulkan yaitu adanya *overshoot*.

Penelitian lain juga menggunakan pengendali *Self Tuning Regulator – PID* (STR-PID), dimana penelitian ini menunjukkan *error steady state* sudah 0°C dan memiliki *rise time* yaitu 1906.8298 detik[1]. Dari penelitian ini menunjukkan bahwa pengendali STR-PID ini memiliki respon sistem yaitu *rise time* yang lambat bahkan lebih lama dari pengujian sistem secara *open loop*.

Beberapa studi literatur dan hasil simulasi secara *open loop*, *annealing lehr* belum dapat mencapai *set point* yang diinginkan. Kajian pustaka mengenai pengendali belum menunjukkan hasil yang bagus, karena masih terdapat *error steady state*. Sistem dikatakan stabil apabila respon terhadap suatu *input* tidak adanya *error steady state*[12]. Penelitian tentang *annealing* menunjukkan bahwa pengontrolan terhadap temperatur sangat penting supaya proses dapat berjalan sesuai keinginan dan masalah utama adalah *error steady state* yang sangat besar dari nilai *set point* yang diberikan.

Pengendali modern yang sudah banyak digunakan saat ini tapi tidak cukup familiar adalah pengendali *Model Predictive Control* (MPC)[13]. Algoritma *Model Predictive Control* (MPC) sudah dikenal dalam industri akan kemampuannya dalam menangani berbagai kendala pada proses[14]. Selama 10 tahun terakhir, *Model Predictive Control* (MPC) telah memantapkan diri dalam industri sebagai bentuk penting dari kontrol lanjutan (Richalet, 1993) karena keunggulannya dibandingkan pengendali tradisional (Garela, Pretti, & Morari, 1989; Muske & Rawlings, 1993). *Model Predictive Control* (MPC) menampilkan peningkatan kinerja karena model proses memungkinkan perhitungan saat ini untuk mempertimbangkan peristiwa dinamis di masa depan[15] dimana pengendali ini mempunyai objektif kontrol yaitu untuk meminimalkan *error* yang terbentuk dari selisih nilai *set point* dengan nilai *output* dari

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

plant, yaitu dalam menangani *error steady state* pada sistem dimana, *Model Predictive Control* (MPC) bisa mengikuti perubahan nilai *set point* yang diinginkan.

Pada kendali konvensional adanya batasan-batasan (*constraint*) dari aktuator yang tidak diperhitungkan di proses pengendalian yang menyebabkan hasil kendali menjadi kurang baik tetapi dengan menggunakan *Model Predictive Control* (MPC) batasan-batasan tersebut tidak ada. Dengan menggunakan *Model Predictive Control* (MPC) dapat memprediksi *output* proses yang akan datang[13] dimana konsep dasar pengendali ini memecahkan masalah optimasi dengan meminimalkan kesalahan antara *set point* dan jalur prediksi yang dapat bekerja secara sistematis[16].

Model Predictive Control (MPC) merupakan salah satu cara lain kendali yang dikembangkan untuk mengendalikan sistem *Multi Input Multi Output* (MIMO)[17] yang mempunyai hubungan *loop*. Kontroler *Model Predictive Control* (MPC) terbukti efektif dalam mencegah pelarian perilaku sistem dengan pencapaian kondisi operasi yang diinginkan dengan lancar dan cepat[15]. Kontroler *Model Predictive Control* (MPC) juga memberikan pengaruh yang cukup kuat terhadap teknik pengaturan[18] dan untuk memprediksi serta mengoptimalkan performansi proses[19]. Dan pengendali *Model Predictive Control* (MPC) ini dipilih karena setelah dilakukan simulasi secara *close loop*, didapatkan performansi sistem menggunakan pengendali ini lebih bagus daripada menggunakan pengendali-pengendali sebelumnya hal ini membuktikan bahwa pengendali ini mampu mengikuti perubahan *set point*.

Berdasarkan penjabaran di atas, maka peneliti ingin melakukan penelitian terhadap pengendalian *annealing lehr* dengan pengendali *Model Predictive Control* (MPC) untuk menguji apakah pengendali ini tetap bisa mengikuti perubahan *set point* yang diberikan dan menghilangkan *error steady state*. Oleh karena itu, penulis mengajukan judul “**Perancangan Model Predictive Control (MPC) Untuk Pengendalian Temperatur pada Annealing Lehr**”

2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana merancang pengendali *Model Predictive Control* (MPC) untuk pengendalian temperatur pada *annealing lehr* agar dapat mengurangi *error steady state* pada saat proses *dwell* sehingga bisa mengikuti perubahan *set point* yang diberikan?

3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah merancang pengendali *Model Predictive Control* (MPC) untuk pengendalian temperatur pada *annealing lehr* agar dapat mengurangi *error steady state* yang mendekati 0°C pada saat proses *dwell* sehingga bisa mengikuti perubahan *set point* yang diberikan.

4. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Penelitian hanya membahas proses *annealing* pada kaca lembaran di PT. Asahimas Flat Glass, tbk Sidoarjo
2. Model yang digunakan adalah model dari sistem matematika dari rujukan penelitian Suyanto dan Miftahuddin
3. Pemodelan matematis hanya mengambil dari *plant* sebelum menggunakan pengendali
4. Jenis kaca yang digunakan pada penelitian ini adalah kaca lembaran
5. Parameter yang digunakan adalah temperatur
6. Sistem yang dikendalikan hanya proses *rapid reheating* dan *dwell* pada *annealing lehr* dengan temperatur 550°C dan 250°C
7. *Set point* yang digunakan pada penelitian ini merujuk pada referensi terkait *annealing lehr*
8. Menggunakan *software* MATLAB untuk melakukan simulasi
9. Desain hanya berupa simulasi tidak membahas tentang *hardware* dari *plant*.

5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat pada penelitian ini adalah:

1. Bagi penulis
 - a. Menambah pengetahuan mengenai perancangan sistem kendali *Model predictive Control* (MPC) pada proses *Annealing Lehr*
2. Bagi mahasiswa Teknik Elektro dan pembaca
 - a. Sebagai referensi tambahan tentang pengendali *Model predictive Control* (MPC)
 - b. Menjadi referensi tambahan untuk penelitian dan penulisan Tugas Akhir

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

3. Bagi Universitas

Menambah koleksi referensi yang ada di perpustakaan Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau

4. Bagi perusahaan

Sebagai referensi dan pertimbangan untuk pengaplikasiannya di bidang industri perusahaan.



UIN SUSKA RIAU

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

1. Penelitian Terkait

Penelitian diawali dengan melakukan analisa pengendalian mutu terjadinya kegagalan berupa kecacatan yang terdapat pada kaca. Perusahaan kaca menerapkan pengendalian mutu dengan adanya *quality control*, dimana bagian ini akan melakukan pengawasan dan pemeriksaan terhadap produksi kaca untuk manajemen mutu produk dan mengurangi tingkat kecacatan seperti timbulnya gelembung serta garis-garis sehingga tampilan dan kualitas kaca menjadi tidak bagus[3].

Dalam perkembangan pengendalian suhu *Annealing* telah banyak dilakukan. Penelitian tentang penerapan PID proses pembuatan kaca lembaran di PT. Asahimas Flat Glass, Tbk Sidoarjo untuk pengaturan pada temperatur[7]. Penerapan PID ini dilakukan pada proses *cooling*, dengan *set point* yang ingin dicapai 450°C , tetapi respon keluaran pada kendali PID masih memiliki *overshoot* $\pm 10\%$ yaitu berkisar $\pm 100^{\circ}\text{C}$ [7] yang disebabkan saat penentuan masing-masing nilai parameter P, I, dan D masih belum tepat karena penentuan paramaternya dilakukan dengan metode *trial and error*. Penelitian ini memiliki keterkaitan dengan penelitian yang penulis lakukan yaitu pengontrolan temperatur di *annealing lehr* namun dengan berbeda pengendali.

Penelitian yang membahas kendali *Linear Quadratik Regulator* (LQR) menunjukkan bahwa pengendalian ini bekerja dengan cara pembobotan matrik Q dan R yang optimal yang dibuat kecil supaya mengikuti *setpoint* yang diberikan dan menghasilkan respon waktu yang cukup baik, dengan *settling time* 6,4 detik, *rise time* 2,8 detik dan tidak adanya *overshoot*, tetapi mempunyai *error steady state* lebih dari 5%[9]. Tetapi pengendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR) ini tidak mampu menghilangkan *error steady state* yang mana akan berpengaruh ke sistem. Keterkaitan penelitian ini dengan penelitian yang penulis lakukan yaitu sama-sama membahas tentang *error steady state* yang terdapat pada sistem.

Penelitian yang dilakukan menggunakan pengendali *hybrid Linear Quadratic Regulator* (LQR) *Proportional Integral Derivatif* (PID), dimana penelitian ini dapat mencapai *setpoint* dengan respon waktu yang lebih baik dari peneliti sebelumnya yang menggunakan pengendali

Linear Quadratic Regulator (LQR) yaitu dengan *rise time* 0,1823 detik, dan *error steady state* menjadi 0,011°C pada *setpoint* 450°C[4]. Penelitian ini masih memiliki keterkaitan dengan penelitian yang akan penulis lakukan yaitu masih terdapatnya *error steady state* pada pengendali ini dan pengendali yang penulis sarankan bisa menghilangkan masalah tersebut.

Penelitian yang dilakukan menggunakan pengendali *Self Tuning Regulator – PID* (STR-PID), menunjukkan bahwa penelitian ini dapat mencapai *set point* yaitu dengan nilai *set point* suhu 1250°C dan 350°C serta adanya perubahan *set point* dari 1250°C ke 350°C serta tidak adanya *overshoot* dan *error steady state* tetapi masih memiliki *rise time* yang cukup lama dari pada sebelum menggunakan pengendali yaitu 1906.8298 detik sedangkan sebelum menggunakan pengendali *rise timenya* 724.8254 detik[1]. Keterkaitan penelitian ini dengan penelitian penulis masih sama-sama membahas sistem *annealing lehr* dan menjadi fokus utama adalah perubahan pada *set point*.

Sisay Achnef dalam penelitiannya menggunakan pengendali PID dan PID fuzzy pada *annealing*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *overshoot* rata-rata adalah 2,12%, *rise time* 45 detik dan *settling time* 180 detik dengan pengendali PID fuzzy sedangkan *overshoot* 16,13%, *rise time* 44 detik dan *settling time* adalah 290 detik menggunakan PID[11].

Evira Dyah Puspitarini[20] dalam penelitiannya menggunakan *Model Predictive Control* (MPC) pada *plant coupled tank* menyatakan bahwa *Model Predictive Control* (MPC) menghasilkan respon sistem yang bisa mengikuti respon model referensi yang diinginkan. Parameter *control horizon* pada pengendali *Model Predictive Control* (MPC) memiliki pengaruh pada sistem, jika nilai *control horizon* semakin kecil maka sistem memiliki waktu respon yang lebih lambat namun *errornya* semakin kecil yaitu 7.0973×10^{-9} pada tangki 1 dan 3.8518×10^{-5} pada tangki 2. *Plant* yang dibahas pada penelitian ini berbeda dengan penulis bahas, namun terdapat keterkaitan yaitu menggunakan pengendali yang sama.

Selanjutnya untuk penelitian yang dilakukan oleh Halim Mudia[19] menunjukkan bahwa *Model Predictive Control* (MPC) dengan *Robust Stator Flux Observer* dapat mengikuti nilai kecepatan acuan yang diberikan pada model motor induksi DTC yaitu 120 rad/s dengan *settling time* 0.753 detik. Pada penelitian ini membuktikan bahwa pengendali *Model Predictive Control* (MPC) bisa mengikuti *set point* atau nilai acuan.

Pada penelitian yang menggunakan pengendali *Model Predictive Control* (MPC) pada *plant quadruple tank* oleh Tri Bowo Setiyo dan dkk menunjukkan bahwa menggunakan pengendali ini mempunyai hasil yang memuaskan, bahwa kendali *Model Predictive Control* (MPC) mampu mengatasi masalah *non minimum phase* sekaligus mampu mempertahankan batasan (*constraint*) pada sinyal kontrol maupun pada sinyal keluaran[21] di tangki dan mampu mengatasi masalah *tracking* maupun regulator pada *quadruple tank*[21]. Pada penelitian ini membuktikan bahwa pengendali *Model Predictive Control* (MPC) bisa diterapkan di *plant* mana saja dengan hasil yang bagus.

Berdasarkan kajian pustaka di atas membuktikan bahwa kendali *Model Predictive Control* (MPC) dapat mengikuti respon sistem yang diberikan dan bisa diterapkan pada *annealing lehr* untuk mengendalikan temperatur sehingga bisa mengikuti *set point* yang diinginkan. Dalam hal ini, terkait pengendalian *annealing lehr* untuk pemodelan matematis dari Suyanto belum ada yang memakai pengendali tersebut. Dengan demikian, penulis ingin melakukan penelitian dengan menggunakan pengendali *Model Predictive Control* (MPC) karena baik dalam memperbaiki respon *transient* seperti *rise time*, *time delay* dan *error steady state*.

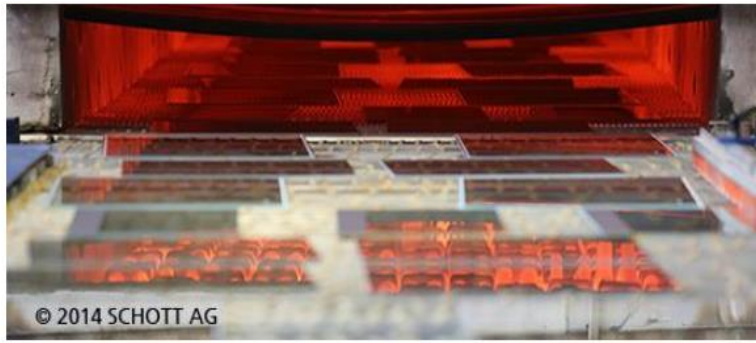
Landasan Teori

2.2.1 Annealing Lehr

Proses *annealing* yaitu proses perlakuan panas yang dilakukan pada kaca atau paduan dalam pembuatan produk. Prinsip *annealing* adalah memanaskan kaca sampai suhu tertentu, dan mempertahankannya selama waktu tertentu lalu didinginkan secara bertahap[22].



Gambar 2. 1 Real Plant Annealing Lehr[23]



Gambar 2. 2 Gambaran Dalam *Annealing Lehr*[23]

Untuk menghasilkan kaca dengan kualitas yang bagus perlu metode yang tepat dalam proses produksinya. Proses pembuatan yang bagus biasanya menggunakan metode *float process*. Prinsip kerja dari *float process* adalah bahan baku yang telah ditimbang dan dicampurkan lalu dilelehkan pada tungku, lalu *molten glass* (leburan kaca pada suhu tinggi) dilewatkan pada *metal bath* (kolam logam) yang berisi *molten tin* dengan densitas yang lebih besar dari densitas *molten glass*, sehingga *molten glass* akan mengapung pada permukaan cairan tersebut[7].

Tempat pengontrolan temperatur untuk mendinginkan kaca disebut *lehr*. Pendinginan cepat dari kaca yang terbentuk di *metal bath* dapat mengakibatkan distribusi suhu yang tidak menyeluruh pada badan kaca sehingga dapat menyebabkan tekanan mekanis yang membuat kaca retak sebelum kaca mencapai suhu lingkungan[7]. Untuk mencegahnya, kaca harus didinginkan menggunakan pendinginan dengan perlahan di *lehr* berdasarkan temperatur di bawah titik pembekuan kaca. Setelah proses selesai di *zone float* pada *metal bath*, kaca harus didinginkan di *annealing lehr*. Jika kaca didinginkan dengan baik, maka diperoleh kaca dengan kualitas baik yang disebut “*cutability*” sehingga mudah untuk dipotong ke bentuk akhir[7].

UIN SUSKA RIAU

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

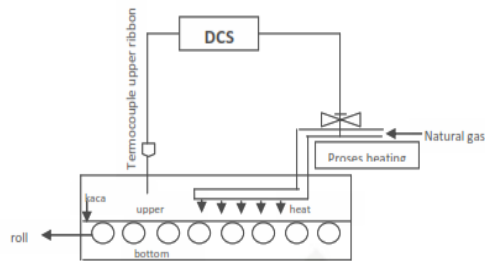
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

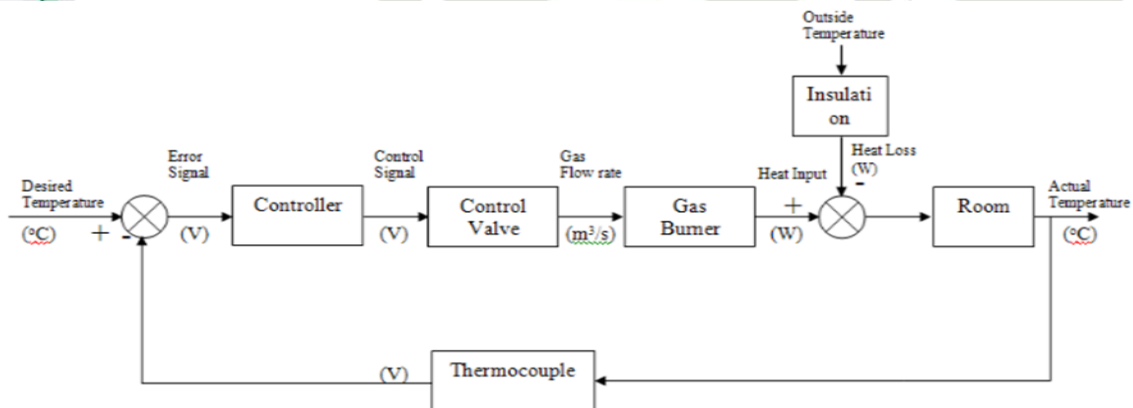
2.2 Permodelan Annealing Lehr

Model matematika pada *annealing*, bisa diperhatikan pada gambar dibawah ini:



Gambar 2. 3 Prinsip Kerja Lehr[7]

Proses *annealing* ada dua yaitu, proses pemanasan dan proses pendinginan, jika digambarkan pada bentuk diagram blok menjadi berikut ini:



Gambar 2. 4 Diagram Blok pada Proses Annealing Lehr[7]

yaitu :

- $\theta_d(t)$ = Desired Temperature ($^{\circ}\text{C}$)
- $\theta_m(t)$ = Measured Temperature ($^{\circ}\text{C}$)
- $\theta_a(t)$ = Actual Temperature ($^{\circ}\text{C}$)
- $U(t)$ = Control Signal (V)
- $V(t)$ = Gas Flow Rate (m^3/s)
- $Q(t)$ = Heat Flow into Room (W)[7].

Pemodelan sistem *plant annealing lehr* dari blok diagram di atas bisa dibuat model persamaannya, langkah pertama *plant* disimulasikan tanpa aksi kendali, blok yang akan dimodelkan merupakan *control valve*, *gas burner* dan *room lehr*. Pemodelan *control valve*

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

perlu untuk mengatur laju aliran gas menuju *room Lehr*[7]. Dimana pemodelan matematis *control valve* dapat ditunjukkan seperti persamaan berikut ini:

$$K_T = \frac{\text{laju aliran maksimum}}{T_1 s} \quad (2.1)$$

K_T = Control Gain control valve
 T_1 = Time Constan control valve

Untuk memperoleh *gain control valve*, menggunakan persamaan:

$$K_{CV} = \frac{\text{laju aliran maksimum}}{\text{perubahan tekanan maksimum}}$$

Gain transducer (I/P) didapat dengan:

$$G_T = \frac{\text{Span output (Kg/m}^2\text{)}}{\text{Span input (mA)}}$$

Lalu *gain* keseluruhan dari *control valve* didapatkan dengan persamaan 2.2

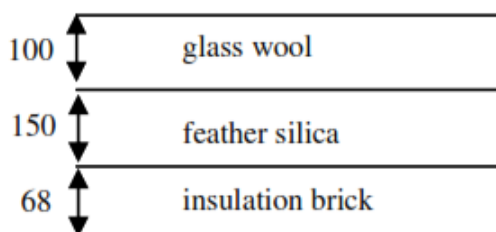
$$K_T = K_{CV} \times G_T \quad (2.2)$$

Pada penelitian sebelumnya konstanta waktu dari *control valve* adalah $T_1 s = 12,24s$.

Variabel yang mempengaruhi sistem adalah gas *burner*, gas *burner* adalah elemen panas pada ruang *annealing Lehr* yang ditandakan dengan R_1 yang mempunyai nilai konstanta = 46488 W. Panas yang didapatkan oleh gas *burner* (K_1) mempengaruhi ketahanan dinding dalam *Lehr*. Resistansi dinding dalam *room Lehr* ditandakan dengan R_T diperoleh berdasarkan pergerakan panas ruangan. Dimana dinding tadi tersusun dari *glass wool*, *feather silica* dan *insulation brick* menggunakan satuan (cm). Resistansi dinding (R_T) diperoleh berdasarkan output dari antara ketebalan dinding (d) dan konduktivitas panas (k)[7]:

$$R_T = \frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{d_3}{k_3} \quad (2.3)$$

Untuk ketebalan dinding dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 5 *Insulation* pada Dinding *Lehr*[7]

Setelah mendapatkan model matematis setiap variabel blok fungsi alih *open loop* sistem diasumsikan temperatur dari lingkungan $\theta_s(t) = 0$ sebagai berikut:



Thermocouple pada *annealing lehr* tidak dimasukkan dalam pemodelan *transfer function open loop* karena hanya sebagai alat ukur atau sensor untuk mengukur temperatur. Dimana berdasarkan jurnal rujukan bahwa setiap 1°C keluaran arus dari *thermocouple* 0.002285 A/C jadi, nilai sensor *thermocouple* dianggap 1 karena keluaran *plant* berupa temperatur.

II-7

Istilah dalam sistem kendali adalah sebagai berikut:

1. *Plant* adalah peralatan dan instrumen yang digunakan sebagai bagian dari sistem yang dikendalikan contohnya adalah peralatan mekanik.
2. Proses adalah prosedur dan mekanisme yang dikendalikan seperti pada plant contohnya kendali sistem penurunan suhu secara bertahap pada annealing
3. Variabel terkendali dan variabel termanipulasi. Variabel terkendali adalah kondisi yang diukur dan dikendalikan adapun variabel termanipulasi adalah kondisi yang diubah oleh kendali sehingga dapat mempengaruhi nilai variabel terkendali, biasanya keluaran sistem.
4. Kendali umpan balik. Saat adanya gangguan, perbedaan antara keluaran dengan masukan acuan sulit diprediksi yang mengakibatkan tujuan pengoperasian sebuah sistem tidak tercapai. Dengan demikian, diperlukan umpan balik keluaran untuk dibandingkan dengan masukan acuan sehingga selisih perbedaan dapat dikendalikan, diminimalkan secara otomatis.
5. Gangguan. Pada sistem riil sering terdapat gangguan yang berpengaruh pada kestabilan kerja sistem, gangguan ini disebabkan oleh sistem itu sendiri ataupun gangguan dari luar sistem.

2.3.1 Sistem Orde Dua

Modelan *plant annealing* adalah sistem orde dua, sistem orde dua dinyatakan dalam persamaan dibawah ini[24]:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.6)$$

dimana:

= *Gain overall*

= Frekuensi alami tak teredam

= Rasio peredaman

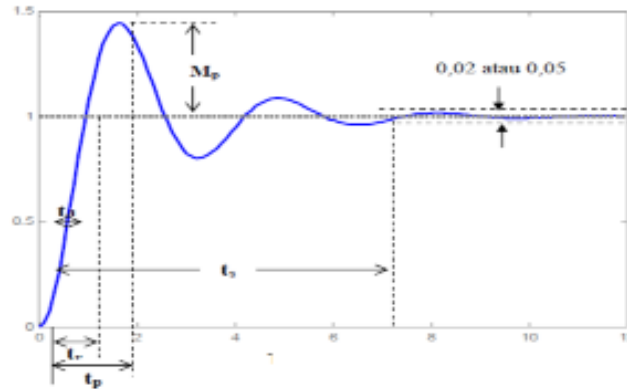
Karakteristik respon transien sistem orde kedua pada Gambar 2.4 terdiri dari:

1. Spesifikasi teoritis
 - Frekuensi alami tak teredam (ω_n) dan rasio peredaman (ξ)
2. Spesifikasi praktis

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Diperoleh dengan asumsi respon sistem orde kedua dalam keadaan (*under damped*)[24].



Gambar 2. 6 Karakteristik Respon Waktu Sistem Orde 2[24]

Spesifikasi praktis orde dua terdiri dari:

1. *Delay Time* (t_d)

Delay Time adalah waktu yang dibutuhkan oleh respon *output* untuk mencapai setengah dari nilai *steady state* tunak untuk waktu yang pertama.

2. *Rise Time* (t_r)

Rise Time adalah waktu yang dibutuhkan oleh respon *output* untuk naik dari 5% menjadi 95% dari nilai *steady state*.

3. *Peak Time* (t_p)

Waktu puncak adalah waktu yang diperlukan respon *output* untuk mencapai puncak pertama *overshoot*.

4. *Overshoot* maksimum (M_p)

Overshoot maksimum adalah nilai puncak kurva respon diukur dari satuan

$$M_p = \frac{c(t_p) - c_\infty}{c_\infty} 100\% \quad (2.7)$$

5. *Settling Time* (t_s)

Waktu tunak adalah waktu yang diperlukan untuk menanggapi kurva agar dapat mencapai dan tetap berada dalam nilai akhir ukuran yang disederhanakan dengan persentase mutlak harga akhirnya yang dihubungkan dengan sebesar sistem kendali biasanya 2% atau 5% [24].

Karakteristik respon keadaan tunak (*steady state*)

Sistem orde dua diukur berdasarkan kesalahan pada keadaan tunak atau *error steady*

(e_{ss}). Besarnya kesalahan pada keadaan tunak adalah

$$e_{ss} = C_{ss} - R_{ss}$$

ana:

\Rightarrow Error Steady State

➤ Masukkan sistem pada *steady state*

y = Keluaran sistem pada *steady state*

Transformasi Bilinear dan *Theorema Shannon*

Perancangan *Model Predictive Control* (MPC) harus menggunakan model *state space* untuk memprediksi respon kedepan dan pada *plant* ini masih menggunakan *transfer function* orde dua, untuk pengubahan nilai *transfer function plant* ke persamaan transformasi Z menggunakan transformasi bilinear berikut[25]:

$$S = \frac{2}{T_S} \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (2.8)$$

Dengan penentuan nilai T_s (*time sampling*) pada transformasi bilinear harus mengikuti ketentuan dari *theorema shannon* berikut[25] :

$$\frac{tr}{10} \leq Ts \leq \frac{tr}{2} \text{ dan } Ts < td \quad (2.9)$$

Nilai T_s ini selanjutnya akan digunakan mencari bentuk *state space* diskrit untuk perancangan *Model Predictive Control* (MPC).

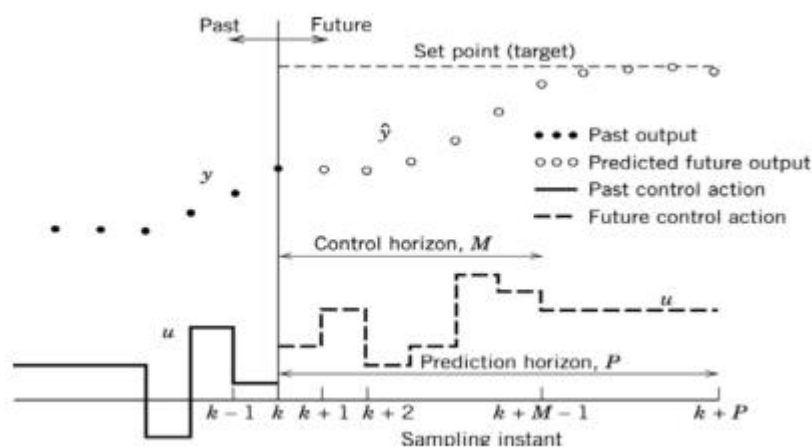
Model Predictive Control (MPC)

Model Predictive Control (MPC) adalah suatu pengendali yang menggunakan model sistem untuk memprediksi perilaku masa depan. *Model Predictive Control* (MPC) merupakan algoritma kendali umpan balik yang menangani sistem *multi input multi output* yang memiliki interaksi antara *input* dan *output*. *Model Predictive Control* (MPC) memecahkan masalah optimasi dengan meminimalkan kesalahan antara referensi dan jalur prediksi yang dapat bekerja secara sistematis[16].

Keunggulan *Model Predictive Control* (MPC) dibandingkan dengan pengendali lain diantaranya adalah :

1. Mudah untuk diimplementasikan ke *plant*
2. Penalarannya sangat mudah
3. Mempunyai kompensasi terhadap *time delay*
4. Dapat menangani sistem lebih dari satu variabel[20]
5. Pengontrolan multivariabel yang mengontrol keluaran secara bersamaan dengan memperhitungkan semua interaksi antara variabel sistem
6. Mempunyai kemampuan pengendali umpan balik untuk mentolerir gangguan yang terukur
7. Bisa menghitung batasan pada sistem dalam mendesain kendali
8. Memasukkan informasi referensi di masa mendatang ke dalam masalah kontrol untuk meningkatkan kinerja pengontrol.

Konsep dasar *Model Predictive Control* (MPC) adalah nilai yang akan datang dari variabel keluaran yang diprediksi menggunakan model dinamik dari suatu proses dan pengukuran saat ini. Perhitungan aksi pengaturan didasarkan pada pengukuran prediksi yang akan datang pada saat ini[26].



Gambar 2. 7 Konsep Dasar *Model Predictive Control* (MPC)[20]

2.5.1 Model State Space

Sistem *Model Predictive Control* (MPC) dirancang dari model matematika *plant*. Model *plant* yang digunakan dirubah menjadi model *state space* akan dibutuhkan untuk memprediksi respon kedepan yang diwakilkan oleh variabel saat ini. Diasumsikan *plant* sebagai *single input single output* (SISO) yang dijelaskan oleh[26]:

$$x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \quad (2.10)$$

$$y(k) = C_m x_m(k) \quad (2.11)$$

di mana:

$u(k)$ = variabel *input*

y = *process output*

x_m = vektor variabel *state*.

Dengan sistem tersebut memiliki $u(k)$ sebagai *inputnya* dan tidak mempengaruhi *output* $y(k)$.

Mengambil operasi delta pada persamaan (2.10), maka dihasilkan:

$$x_m(k+1) - x_m(k) = A_m (x_m(k) - x_m(k-1)) + B_m (u(k) - u(k-1))$$

Persamaan beda variabel *state* dapat dinotasikan sebagai berikut:

$$\Delta x_m(k+1) = x_m(k+1) - x_m(k);$$

$$\Delta x_m(k) = x_m(k) - x_m(k-1)$$

dan delta variabel *control* dapat dinotasikan sebagai berikut:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$$

sehingga persamaan (2.10) *state space* nya adalah:

$$\Delta x_m(k+1) = A_m \Delta x_m(k) + B_m \Delta u(k) \quad (2.12)$$

dengan catatan *input* model *state space* adalah $\Delta u(k)$. Selanjutnya adalah menghubungkan

$\Delta x_m(k)$ ke *output* $y(k)$ dan di bentuk vektor variabel *state* baru:

$$x(k) = [\Delta x_m(k)^T y(k)]^T$$

$$y(k+1) - y(k) = C_m (x_m(k+1) - x_m(k)) = C_m \Delta x_m(k+1)$$

atau

$$y(k+1) - y(k) = C_m A_m \Delta x_m + C_m B_m \Delta u(k) \quad (2.13)$$

2.5.2 Controllable Cannonical Form

Kendali *Model Predictive Control* (MPC) memerlukan pemodelan fungsi alih yang baik supaya kendali yang telah dirancang bisa bekerja secara optimal. Fungsi alih yang telah didapatkan tidak bisa langsung digunakan tetapi dirubah ke dalam bentuk *controllable canonical form*[27].

$$\frac{y(z)}{u(z)} = \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{1 z^2 + a_1 z + a_2} \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (2.15)$$

$$y(k) = [b_2 - a_2 b_0 \quad b_1 - a_1 b_0] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

2.5.3 Desain Augmented Model

Dengan memasukkan persamaan (2.12) dan (2.13) digabungkan membentuk model *state space*nya

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ C_m B_m \end{bmatrix} u(k) \quad (2.17)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} 0_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix}$$

di mana $0_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$. A, B, C adalah *augmented model* yang digunakan di dalam perancangan *predictive control*[26].

2.5.3 State Prediksi dan Variabel Output

Tahapan selanjutnya di perancangan sistem *Model Predictive Control* (MPC) yaitu menghitung *output plant* yang diprediksi dengan sinyal kontrol yang akan datang sebagai variabel yang bisa diatur. Variabel kontrol yang akan datang dinotasikan oleh:

$$\Delta u(k_i), \Delta u(k_i + 1), \dots, \Delta u(k_i + N_c + 1)$$

Dengan asumsi bahwa k_i merupakan instan sampling, *state* $x(k_i)$ menyediakan informasi *plant* saat ini, sedangkan N_c yaitu *control horizon* yaitu jumlah langkah berkelanjutan yang diprediksi oleh *Model Predictive Control* (MPC) dalam sebuah waktu

Sampling. Dengan informasi yang diberikan $x(k_i)$, variabel *output* yang akan diprediksi untuk N_p , dimana N_p yaitu *prediction horizon*. Variabel *output* yang akan datang sebagai :

$$x(k_i + 1|k_i), x(k_i + 2|k_i), \dots, x(k_i + m|k_i), \dots x(k_i + N_p|k_i) \quad (2.18)$$

dimana $x(k_i + m|k_i)$ adalah variabel *state* yang diprediksi saat $k_i + m$ dengan informasi *plant* yang diberikan saat ini $x(k_i)$. Nilai N_c harus lebih kecil atau sama dengan nilai N_p . Setelah itu, nilai *output* terprediksi (F) dan variabel yang akan datang (Φ) bisa dihitung dengan persamaan (2.19).

$$Y = Fx(k_i) + \Phi \Delta U \quad (2.19)$$

dimana matriks F , Φ dan ΔU diformulasikan sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

2.5.4 Indeks Performansi Model Predictive Control (MPC)

Pada kendali *Model Predictive Control* (MPC) dibutuhkannya proses optimasi yang mempunyai objektif kontrol untuk meminimalkan *error* yang terbentuk dari selisih nilai referensi dengan nilai *output* dari *plant*. Optimasi tersebut dilakukan dengan mendeskripsikan sebuah nilai dan parameter indeks performansi J yang merefleksikan objektif kontrol dari kendali *Model Predictive Control* (MPC). Dengan mengasumsikan bahwa data vektor yang berisikan informasi *set point* adalah:

$$R_s = \overbrace{[1 \ 1 \ \dots \ 1]}^{N_p} r(k_i) \quad (2.22)$$

dan mendefinisikan *cost function* J yang mencerminkan objektif kontrol sebagai:

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U \quad (2.23)$$

R_s adalah vektor yang berisi sinyal referensi atau sinyal *set point* yang dinotasikan pada persamaan (2.22). pada persamaan (2.23) indeks performansi J bertujuan untuk meminimalkan *error* yang terjadi antara nilai *output* yang terprediksi dengan *set point* yang dimasukkan. Sedangkan persamaan $\Delta U^T \bar{R} \Delta U$ untuk merefleksikan seberapa besar nilai ΔU yang akan

Hasilkan ketika indeks performansi J dibuat sekecil mungkin. Matriks \bar{R} adalah matriks diagonal yang berbentuk $r_w I_{N_c \times N_c}$ ($r_w \geq 0$) digunakan untuk parameter tuning kendali *Model Predictive Control* (MPC). Pada saat nilai $r_w = 0$, indeks performansi J akan mempunyai objekti untuk meminimalkan nilai *error* dari $(R_s - Y)^T (R_s - Y)$ sekecil mungkin dengan mengabaikan besar nilai ΔU .

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.22) ke persamaan (2.23) dan diturunkan terhadap ΔU sama dengan nol maka akan mendapatkan persamaan solusi optimal kontrol seperti persamaan (2.24) dengan *set point* $r(k_i)$:

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s r(k_i) - Fx(k_i)) \quad (2.24)$$

$$\Delta U(k_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^{N_c} (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s r(k_i) - Fx(k_i)) \quad (2.25)$$

Nilai optimal parameter pada ΔU merupakan vektor yang mengandung sinyal kontrol $\Delta u(k_i + 1|k_i) \quad \Delta u(k_i + 2|k_i) \quad \dots \quad \Delta u(k_i + N_c + 1)$. Dikarenakan prinsip dari *Receding Horizon Control* (RHC), kita hanya dapat mengimplementasikan sampel pertama dan mengabaikan urutan selanjutnya. Ketika periode sampling selanjutnya datang, nilai pengukuran yang paling baru diambil dari *state vector* $(k_i + 1)$ untuk perhitungan sinyal kontrol yang baru. Oleh karena itu, sinyal kontrol dari persamaan (2.24) dapat ditulis ulang

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s r(k_i) - Fx(k_i))$$

atau

$$\Delta U = K_y r(k_i) - K_{mpc} x(k_i) \quad (2.26)$$

Lalu untuk *gain Model Predictive Control* (MPC) dimana K_y adalah baris pertama dari matriks

$$(\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T \bar{R}_s) \quad (2.27)$$

dan K_{mpc} merupakan baris pertama dari matriks

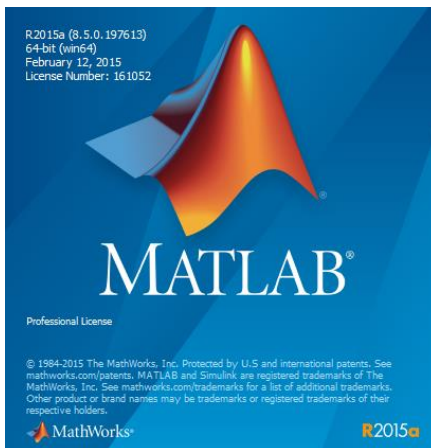
$$(\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T F \quad (2.28)$$

6 Program Matlab

Matlab (*Matrix Laboratory*) adalah bahasa pemrograman tingkat tinggi dengan kinerja tinggi untuk komputasi masalah teknik. Matlab mengintegrasikan komputasi, visualisasi, dan pemrograman dalam sebuah lingkungan tunggal.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

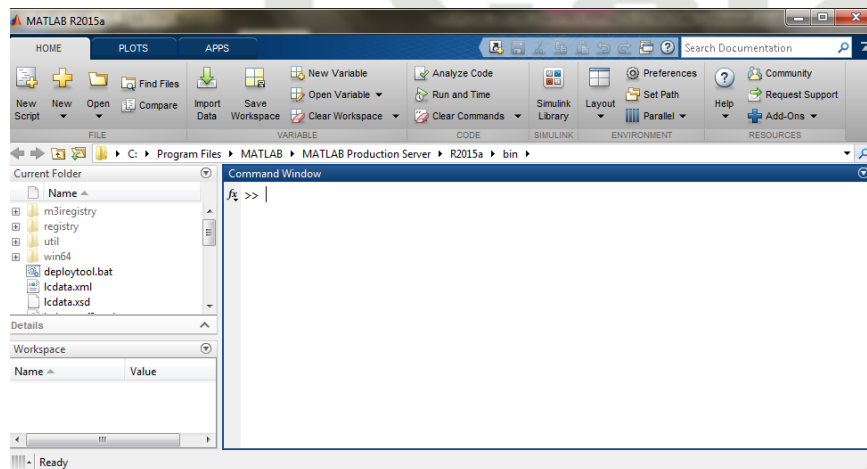
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2. 8 Matlab

Pada penelitian ini fitur yang digunakan adalah *Simulink*, dimana pada Simulink ini dapat dilakukan pemodelan dan simulasi suatu sistem. Tiruan sistem diinginkan memiliki perilaku yang serupa dengan sistem fisik, simulasi bisa membantu proses analisis dan perancangan sistem. Simulink dalam Matlab bisa menunjukkan performansi sistem dalam bentuk dua atau tiga dimensi. Untuk mendesainnya pengguna menjadi lebih mudah karena adanya blok-blok diagram yang mudah diatur, sesuai model matematis dari *plant* yang akan dikendalikan.

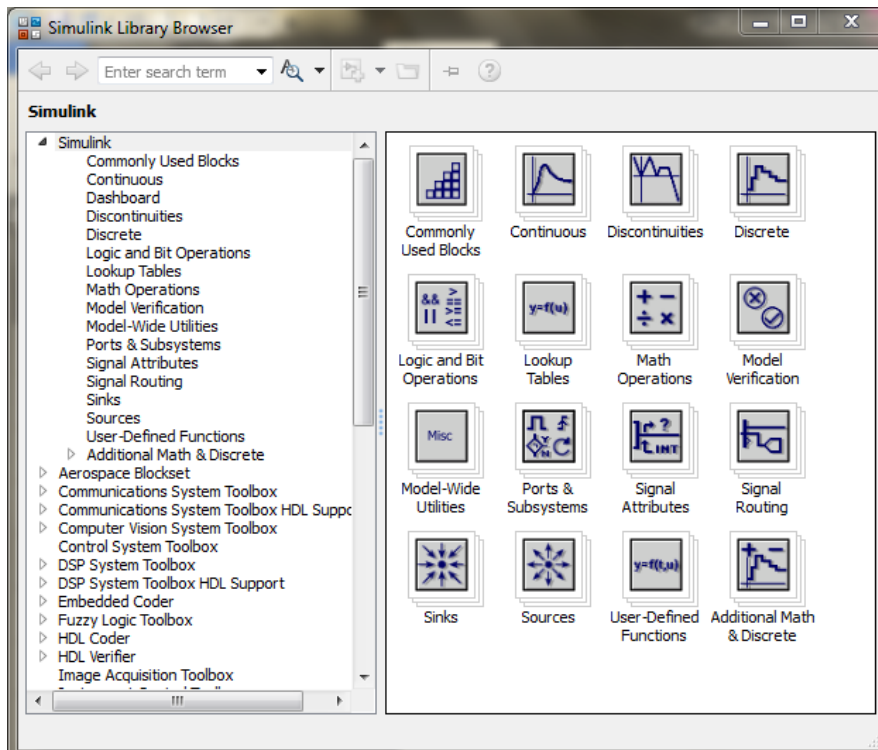
Pada penelitian ini dilakukan pemrograman modeling dan simulasi untuk mendapatkan hasil penelitian yang diinginkan. fitur Matlab yang digunakan untuk simulasi ini disebut Simulink.



Gambar 2. 9 Tampilan Model Simulink pada Matlab

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



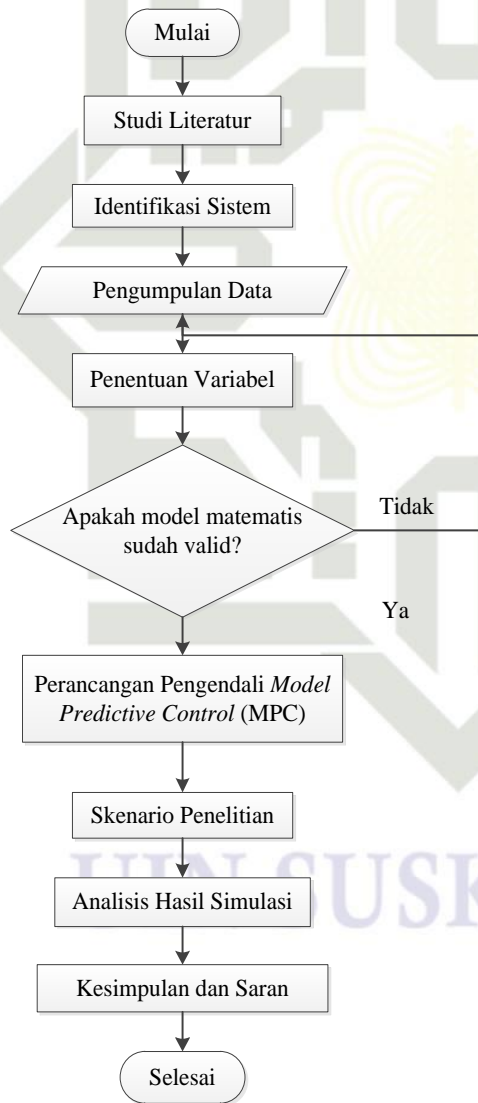
Gambar 2. 10 Kotak Dialog *Simulink Library*

BAB III

METODE PENELITIAN

Flowchart Metode Penelitian

Jenis penelitian pada tugas akhir ini adalah berupa simulasi dimana tahapan-tahapan yang akan peneliti lakukan yaitu mulai dari penentuan judul, perumusan masalah, tujuan yang diharapkan dari suatu penelitian yang dilakukan, proses pemodelan matematis sistem, perancangan pengendali hingga mendapatkan hasil akhir dalam penelitian Tugas Akhir ini. Ada pun alur penelitian yang dilakukan dapat digambarkan melalui *flowchart* sebagai berikut:



Gambar 3. 1 *Flowchart* Penelitian

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Tahapan Penelitian

Berdasarkan *flowchart* penelitian tersebut, agar tujuan penelitian dapat tercapai, beberapa tahapan penelitian yang harus dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur

Tahap yang pertama adalah studi literatur yaitu mempelajari penelitian terkait dari beberapa referensi seperti buku, *paper*, jurnal dan sumber lainnya mengenai *annealing lehr* dan pengendali *Model Predictive Control* (MPC).

2. Identifikasi Sistem

Adapun masalah yang diangkat pada penelitian Tugas Akhir ini adalah pengendalian temperatur menggunakan rancangan kendali *Model Predictive Control* (MPC) untuk diterapkan pada *Annealing Lehr* untuk menghilangkan *error steady state*.

3. Pengumpulan data

Pengumpulan data dilakukan untuk mendapatkan karakteristik dari *plant* yang akan diteliti dan mengetahui permodelan matematis *annealing* dalam bentuk *transfer function*.

4. Penentuan variabel

Setelah nilai dari masing-masing variabel pada tahap pengumpulan data didapatkan, kemudian variabel-variabel tersebut dimasukkan ke dalam pemodelan matematis sistem pada persamaan 2. dalam bentuk *transfer function*

$$G(S) = \frac{K}{as^2 + bs + c}$$

dengan :

$$\frac{\theta(s)}{u(s)} = \frac{K_T K_1 R_T}{(1 + T_1 s)(1 + R_T C_T s)}$$

5. Verifikasi pemodelan matematis

Verifikasi pemodelan matematis sistem adalah tahap pengujian model matematis dalam bentuk *transfer function* dari sistem yang sudah diubah ke dalam bentuk bahasa pemrograman Matlab Simulink[7].

6. Perancangan pengendali *Model Predictive Control* (MPC)

Di tahap ini peneliti merancang pengendali *Model Predictive Control* (MPC) supaya respon *output* sistem mengikuti nilai *set point* yang diberikan yang terdapat di jurnal rujukan.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Analisa hasil pengujian

Di tahap ini peneliti menganalisa *output* sistem sebelum dan sesudah dipasang pengendali. Apabila telah terpenuhi penelitian yang dilakukan berhasil, dan apabila sebaliknya maka perlu dikaji lebih lanjut.

8. Kesimpulan

Setelah melakukan analisa hasil dan sudah sesuai dengan tujuan maka penelitian yang dilakukan berhasil dan bisa ditarik kesimpulan, juga memberikan saran untuk dijadikan referensi penelitian selanjutnya.

3. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan cara mencari data apa saja yang dibutuhkan dari penelitian-penelitian terkait yang bertujuan untuk menentukan *set point* yang akan digunakan. Berdasarkan penelitian terkait yang sudah dilakukan *review* bahwa *set point* yang digunakan adalah perubahan suhu dari 550°C ke 250°C [8].

4. Pemodelan Matematis *Annealing Lehr*

Berdasarkan persamaan (2.5) dimasukkan nilai-nilai parameternya pada tabel 3.1

Tabel 3. 1Parameter *Annealing*[7]

No.	Parameter <i>Annealing Lehr</i> pada Proses <i>Heating</i>	Nilai
1	Kapasitansi termal udara (C_T)	80 s J/K
2	Kontanta gas <i>burner</i> (K_1)	46488 W
3	Konduktivitas termal <i>insulation brick</i> (k_3)	0.16270 W/m $^{\circ}\text{C}$
4	Konduktivitas termal <i>feather silica</i> (k_2)	0.08135 W/m $^{\circ}\text{C}$
5	Konduktivitas termal <i>glass wool</i> (k_1)	0.11619 W/m $^{\circ}\text{C}$
6	Ketebalan dinding <i>insulation brick</i> (d_3)	68 cm
7	Ketebalan dinding <i>feather silica</i> (d_2)	150 cm
8	Ketebalan dinding <i>glass wool</i> (d_1)	100 cm
9	Konstanta <i>control valve</i> (T_1)	12,24 s
10	Gain <i>tranducer</i> (G_T)	6250000 kg/(m 2 A)
11	Gain <i>control valve</i> (K_{cv})	3,3333X10 $^{-9}$ m 5 /(kgs)

dengan masing-masing nilai K_T dan R_T dari persamaan 2.2

$$K_T = K_{CV}G_T \\ (3.3333 \times 10^{-9} \text{ m}^5/\text{kgs})(6933333.3 \text{ kg/m}^2\text{A}) \\ 0.0208 \text{ m}^3\text{kg/sA}$$

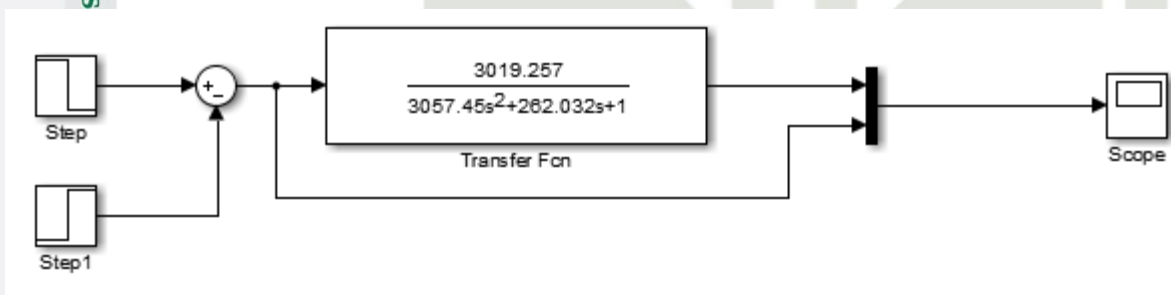
$$R_T = \frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{d_3}{k_3} \\ = \frac{100 \text{ m}}{0,11619 \text{ W/m}^0\text{c}} + \frac{150 \text{ m}}{0,08135 \text{ W/m}^0\text{c}} + \frac{68 \text{ m}}{0,16270 \text{ W/m}^0\text{c}} \\ = 3,1224 \text{ m/W}^0\text{c}$$

Maka diperoleh *transfer function Annealing Lehr*:

$$\frac{\theta(s)}{u(s)} = \frac{0.0208 \text{ m}^3\text{kg/sA} \times 46488.8 \text{ W} \times 3.1224 \text{ m/W}^0\text{c}}{(1+12.245s)+(1+3.1224 \text{ m/W}^0\text{c} \times 80 \text{ J/K})} \\ \frac{\theta(s)}{u(s)} = \frac{3019.257}{3057.45s^2+262.032s+1} \quad (3.1)$$

5 Verifikasi Pemodelan Matematis

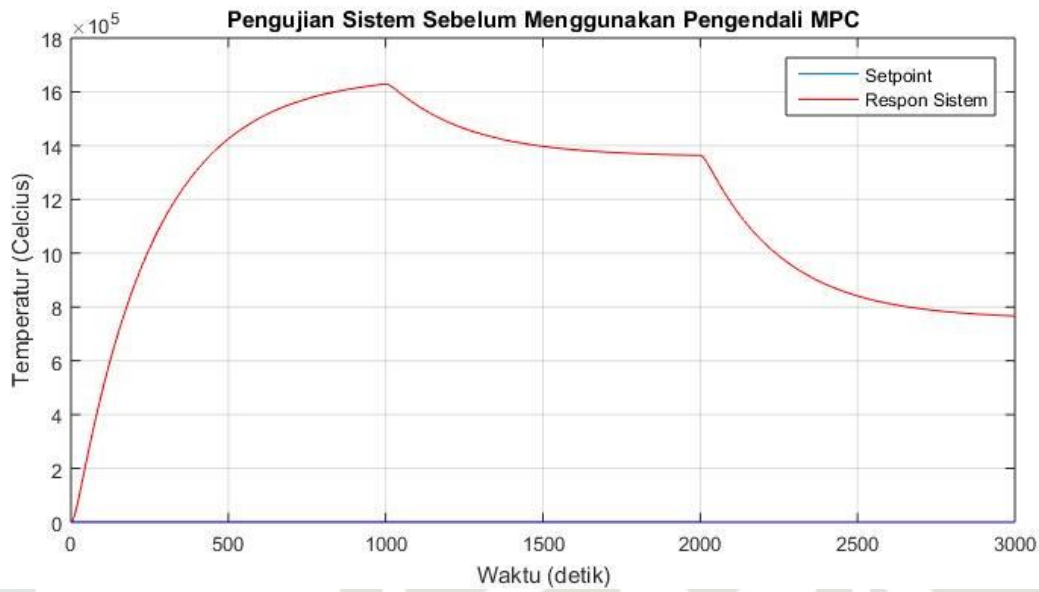
Verifikasi pemodelan matematis untuk proses *annealing* dilakukan menggunakan *simulink* Matlab 2015a dimana pemodelan matematis ini telah sama dengan jurnal rujukan yaitu pada penelitian penelitian tentang penerapan PID proses pembuatan kaca lembaran di PT. Asahimas Flat Glass, Tbk Sidoarjo untuk pengaturan pada temperatur[7]. Gambar 3.2 merupakan blok simulink pengujian sistem secara *open loop* tanpa pengendali untuk mengetahui perilaku dan karakteristik dari sistem sebelum dirancang dengan menggunakan *set point* 550°C seperti gambar dibawah ini :



Gambar 3. 2 Blok *Simulink* Digram *Open Loop Annealing Lehr*

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3. 3 Respon *Open Loop* Temperatur pada *Annealing*

Gambar 3.3 merupakan hasil repon dari sistem *annealing lehr* tanpa menggunakan pengendali. Peneliti menggunakan perubahan *set point* yaitu 550 ke 250 dengan tahapan perubahan dari 550°C ke 450°C lalu 450°C ke 250°C agar nampak gambaran proses *rapid reheating* dan *dwell* di pensimulasian. Berdasarkan grafik respon sistem di atas terlihat bahwa sistem melewati *set point* yang ditentukan yaitu 550°C ke 250°C, dimana sistem menunjukkan nilai yang besar dalam waktu 1000 detik. Hal ini menunjukkan bahwa sistem masih menghasilkan *error steady state* yang sangat besar dan tidak bisa mengikuti perubahan *set point* yang diberikan.

Perancangan Pengendali *Model Predictive Control* (MPC)

Perancangan desain pengendali *Model Predictive Control* (MPC) adalah untuk mengontrol temperatur pada *lehr* agar sesuai dengan temperatur yang diinginkan. Dalam *plant lehr* ini dibutuhkan respon yang stabil dimana temperatur yang dihasilkan untuk memanaskan kaca sesuai dengan *setpoint* yang diinginkan[7]. Setelah *transfer function* dari sistem didapatkan, selanjutnya adalah merancang pengendali untuk sistem. Tahapan rancangan kendali ini yaitu perancangan fungsi alih pada model *state space*, desain *augmented model*, dan penentuan parameter kendali *Model Predictive Control* (MPC)[13]

6.1 Menentukan Respon Transient dari Sistem Berdasarkan Hasil Open Loop

Karakteristik dari fungsi alih (*transfer function*) dari *plant* pada penelitian ini merupakan sistem orde dua yang diubah menjadi persamaan diskrit dengan persamaan (2.8) dan (2.9) transformasi bilinear yang menggunakan *thorema shanon* dengan penentuan nilai T_s (*time sampling*) untuk transformasi bilinear mempunyai kondisi yang harus dipenuhi yaitu: $\frac{t_r}{10} \leq T_s$ dan $T_s < t_d[25]$.

Setelah itu menentukan nilai t_r (*rise time*) dan t_d (*time delay*) didapat dari data *open loop* dengan perbesaran layar pada *scope* untuk memenuhi kondisi kedua dalam menentukan nilai t_s dimana

Nilai *rise time* (t_r) (5%-95%) *setpoint*

$$\begin{aligned} y_{5\%} &= 5\% \text{ dari } \textit{steady state} \\ &= 5\% \times 1.661 \times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C} \\ &= 8.3050 \times 10^4 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

dengan menggunakan cara pembesaran layar (*zoom*) pada *scope* didapatkan waktu untuk mencapai 5% dari *set point* dengan suhu $8.3050 \times 10^4 \text{ } ^\circ\text{C}$ adalah 23.3657 detik jadi, $t_{5\%} = 23.3657$ detik.

$$\begin{aligned} y_{95\%} &= 95\% \text{ dari } \textit{steady state} \\ &= 95\% \times 1.661 \times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C} \\ &= 1.5779 \times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

dengan menggunakan cara pembesaran layar (*zoom*) pada *scope* didapatkan waktu untuk mencapai 95% dari *set point* dengan suhu $1.5779 \times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C}$ adalah 761.8281 detik jadi, $t_{95\%} = 761.8281$ detik.

$$\begin{aligned} \text{Maka } t_r (95\% - 5\%) &= t_{95\%} - t_{5\%} \\ &= 761.8281 \text{ detik} - 23.3657 \text{ detik} \\ &= 738.4624 \text{ detik} \end{aligned}$$

Nilai *delay time*

$$\begin{aligned} 50\% \text{ dari } \textit{steady state} &= 50\% \times 1.661 \times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C} \\ &= 8.3050 \times 10^5 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

dengan menggunakan cara pembesaran layar (*zoom*) pada *scope* didapatkan waktu untuk mencapai 50% dari *set point* dengan suhu $8.3050 \times 10^5 \text{ } ^\circ\text{C}$ adalah 186.7552 detik jadi $t_d = 186.7552$ detik.

Setelah mendapatkan nilai dari t_d (*time delay*) yang didapat dari data open loop yang telah dilakukan dengan pembesaran layar (*zoom*) pada *scope* untuk memenuhi kondisi kedua dalam menentukan nilai T_s .

Dimana nilai T_s untuk transformasi bilinear :

$$\frac{t_r}{10} \leq T_s \leq \frac{t_r}{2}$$

$$\frac{702.8618}{10} \leq T_s \leq \frac{702.8618}{2}$$

$$70.28618 \text{ detik} \leq T_s \leq 351.4309 \text{ dan } T_s < 186.7552 \text{ detik}$$

Maka nilai T_s (*time sampling*) yang akan digunakan pada transformasi bilinear mengikuti ketentuan dengan persamaan (2.9) maka dipilih nilai t_s (*time sampling*) yang akan digunakan adalah 75 detik

3.6.2 Perubahan *Transfer Function* ke Bentuk Model *State Space*

Untuk perancangan kendali *Model Predictive Control* (MPC), lalu fungsi alih di persamaan (3.1) perlu dirubah ke bentuk *state space* seperti berikut :

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{3019.257}{3057.45s^2 + 262.032s + 1}$$

$$3019.257U(s) = 3057.45s^2\theta(s) + 262.032s\theta(s) + \theta(s)$$

$$3019.257U = 3057.45 \frac{d^2\theta}{dt^2} + 262.032 \frac{d\theta}{dt} + \theta$$

$$3019.257U = 3057.45\ddot{\theta} + 262.032\dot{\theta} + \theta$$

Di definisikan :

$$x_1 = \theta \rightarrow \dot{x} = \dot{\theta} = x_2$$

$$x_2 = \dot{\theta} \rightarrow \dot{x}_2 = \ddot{\theta} = -0.0857\dot{\theta} - 0.000327\theta + 0.9875U$$

$$= -0.0857x_2 - 0.000327x_1 + 0.9875U$$

$$3019.257U = 3057.45\ddot{\theta} + 262.032\dot{\theta} + \theta$$

$$3057.45\ddot{\theta} = -262.032\dot{\theta} - \theta + 3019.257U$$

$$\ddot{\theta} = \frac{-262.032\dot{\theta} - \theta + 3019.257U}{3057.45}$$

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$\ddot{\theta} = -0.0857\ddot{\theta} - 0.000327\ddot{\theta} + 0.9875U$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -0.0857x_2 - 0.000327x_1 + 0.9875U \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.000327 & -0.0857 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} U$$

$$[y] = [0.9875 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Solusi persamaan keadaan :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.000327 & -0.0857 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} U \quad (3.2)$$

Persamaan keluaran :

$$y = cx$$

$$[y] = [0.9875 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Jadi dari persamaan keadaan (3.2) dan persamaan keluaran (3.3), dapat ditentukan matriks *state space* A, B, C dan D seperti berikut :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.000327 & -0.0857 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$C = [0.9875 \quad 0] \quad (3.6)$$

$$D = [0] \quad (3.7)$$

Setelah mendapatkan hasil dari *state space* kontinu selanjutnya adalah merubahnya dalam bentuk *state space* diskrit yang dimasukkan dari persamaan (3.4) dan (3.6) ke persamaan (2.8) dimana nilai $Y(z)$ adalah matriks dari C dan $X(z)$ adalah nilai dari matriks A sehingga:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{0.9875}{\left(\frac{2}{75} \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^2 + 0.085 \left(\frac{2}{75} \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) + 0.00032}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{0.9875}{\left(0.026 \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^2 + 0.085 \left(0.026 \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) + 0.00032}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{0.9875}{0.00676 \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^2 + 0.00221 \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) + 0.00032}$$

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

3.6.3 Controllable Cannonical Form

Kendali *Model Predictive Control* (MPC) memerlukan pemodelan fungsi alih yang baik supaya kendali yang telah dirancang bisa bekerja secara optimal. Fungsi alih yang telah didapatkan tidak bisa langsung digunakan tetapi dirubah ke dalam bentuk *controllable canonical form*[27]. Setelah mendapatkan nilai dari *state space* diskrit selanjutnya lakukan pembagian penyebut dengan nilai 0.003206 untuk mendapatkan nilai 1 agar bisa mengikuti bentuk *controllable canonical form* berdasarkan persamaan (2.15)

$$\begin{aligned}\frac{Y(z)}{U(z)} &= \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{1z^2 + a_1 z + a_2} \\ \frac{Y(z)}{X(z)} &= \frac{0.987 + 1.974z^{-1} + 0.987z^{-2}}{0.003206 - 0.01288z^{-1} - 0.001214z^{-2}} \div 0.003206 \\ \frac{Y(z)}{X(z)} &= \frac{307.8602620087 + 615.7205240175z^{-1} + 307.8602620087z^{-2}}{1 - 4.017466672489z^{-1} - 0.3786650031z^{-2}} \\ \frac{Y(z)}{X(z)} &= \frac{307.8602620087 + 615.7205240175z^{-1} + 307.8602620087z^{-2}}{1 - 4.01746667248z^{-1} - 0.3786650031z^{-2}} \times z^2\end{aligned}$$

Maka *state space* diskrit dari *annealing lehr* adalah sebagai berikut :

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{307.8602620087z + 615.7205240175z^{-1} + 307.8602620087z}{1z^2 - 4.01746667248z^{-1} - 0.3786650031z}$$

dimana

$$a_1 = -4.01746667248$$

$$a_2 = -0.3786650031$$

$$b_1 = 307.8602620087$$

$$b_2 = 615.7205240175$$

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$b_2 = 307.8602620087$$

dibawah ini adalah bentuk *controllable cannonical form* yang mana bentuk *state space*

untuk orde dua ini mempunyai bentuk seperti di bawah ini berdasarkan dari persamaan (2.15)

ini dapatlah persamaan (3.8) dan (3.9)[27]:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (3.8)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} b_2 - a_2 b_0 & b_1 - a_1 b_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Berdasarkan bentuk di atas, maka model *state space* dari persamaan (3.8) dan (3.9) dapat dibuat sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0.378602620087 & 4.01746667248 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (3.10)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} 424.4361690766 & 1852.5388825257 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.6.4 Desain Augmented Model

Desain *augmented model* adalah dengan mengubah bentuk *state space* ke dalam *augmented model* dari model yang sudah didiskritisasi. Berdasarkan persamaan dari (2.17)

Dimasukkan hasil yang telah didapat dari persamaan (3.10) and (3.11) sehingga

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overbrace{0 \quad 1}^{A_m} \\ \underbrace{0.3786650031 \quad 4.01746672489}_{C_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \overbrace{0}^{B_m} \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (3.12)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} \overbrace{424.4361690766 \quad 1852.5388825257}^{C_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Berdasarkan persamaan (3.12) dan (3.13) kita merubah bentuk *state space* di atas menjadi bentuk persamaan (2.17) yaitu *augmented model*

$$\begin{bmatrix} \overbrace{\Delta x_m(k+1)}^{x(k+1)} \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overbrace{A_m \quad 0_m^T}^A \\ \underbrace{C_m \quad A_m}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overbrace{\Delta x_m(k)}^{x(k)} \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \overbrace{B_m}^B \\ \underbrace{C_m \quad B_m}_1 \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (3.14)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} \overbrace{0 \quad 0 \quad 1}^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Sehingga *augmented model* dari *annealing lehr* seperti dibawah ini

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

2. Dilarang mengutip dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1.3786650031 & 4.01746672489 & 0 \\ 701.4916417 & 7866.9 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1852.5388825257 \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (3.16)$$

$$\begin{bmatrix} x(k) \\ \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Matriks A, B, C merupakan bentuk *augmented model* digunakan selanjutnya dalam merancang kontroler *Model Predictive Control* (MPC).

3.6.5 State Prediksi dan Variabel Output Model Predictive Control (MPC)

Langkah selanjutnya adalah menentukan parameter dari kontroler *Model Predictive Control* (MPC). Parameter yang disini adalah *prediction horizon* (N_p), *control horizon* (N_c), dan *tuning parameter* pada indeks performansi (r_w). Pada perancangan *Model Predictive Control* (MPC) di *annealing lehr*, diambil satu bentuk sampel yang akan menggunakan parameter *prediction horizon* sebesar 5 langkah, *control horizon* sebesar 1 langkah, dan *tuning parameter* indeks performansi sebesar 0,2. Berdasarkan persamaan (3.16) dan (3.17), nilai *output* terprediksi dan variabel kontrol yang akan datang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dari (2.21) menjadi persamaan dibawah ini:

$$Y = Fx(k_i) + \Phi \Delta U \quad (3.18)$$

Matriks F dan Φ dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ CA^{N_p-1} & CA^{N_p-1}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Setelah nilai parameter kontroler ditentukan, maka kita dapat menentukan nilai matriks

F dan Φ sebagai berikut :

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ CA^4 \\ CA^5 \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 \\ CAB & CB \\ CA^2B & CAB \\ CA^3B & CA^2B \\ CA^4B & CA^3B \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Langkah selanjutnya adalah memasukkan persamaan (3.16) nilai matriks *augmented* ke persamaan (3.20). Hasil yang didapatkan dapat dilihat pada persamaan dibawah ini

$$= \begin{bmatrix} 701.5 & 7866.9 & 1 \\ 1680 & 40.173 & 1 \\ 15910 & 172.940 & 1 \\ 66190 & 718.570 & 1 \\ 272800 & 2960900 & 1 \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} 0.0185 \\ 0.0972 \\ 0.4203 \\ 1.7480 \\ 7.2042 \end{bmatrix}$$

3.6.6 Indeks Performansi Model Predictive Control (MPC)

Indeks performansi sinyal kontrol diperlukan agar *output* sistem memiliki nilai sedekat mungkin dengan *set point*. Setelah matriks F dan Φ didapatkan, parameter selanjutnya adalah *gain* dari Model Predictive Control (MPC). Untuk mencari nilai K_{MPC} , terlebih dahulu kita harus mencari nilai dari matriks Y dari persamaan (2.27) sebagai berikut:

$$Y = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T F) \quad (3.21)$$

Setelah perhitungan dari matriks F dan Φ didapat hasilnya sebagai berikut:

$$Y = [0.3773 \quad 4.0952 \quad 0.1714]$$

Nilai *gain* K_{MPC} adalah baris pertama dari matriks Y . Oleh karena itu, nilai *gain* K_{MPC} adalah:

$$K_{MPC} = [0.3773 \quad 4.0952 \quad 0.1714] \quad (3.22)$$

Setelah *gain* K_{MPC} didapatkan, selanjutnya adalah *gain* K_y dari persamaan (2.28). *Gain* dapat dihitung dari nilai matriks Z sebagai berikut:

$$Z = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T \bar{R}_S) \quad (3.23)$$

Setelah penghitungan dari matriks F dan Φ , didapat hasilnya sebagai berikut:

$$Z = [94.2949]$$

Gain K_y adalah baris pertama dari matriks Z . Maka nilai K_y adalah:

$$K_y = [94.2949]$$

Notasi ΔU dari persamaan (2.24)

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + R)^{-1} \Phi^T (\bar{R}_S r(k_i) - Fx(k_i))$$

Setelah perhitungan dari matriks ΔU didapat hasilnya sebagai berikut:

$$\Delta U = [-0.8728]$$

Memasukkan nilai-nilai ke persamaan (2.25)

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$\Delta U(k_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^{N_c} (\Phi^T \Phi + R)^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s r(k_i) - Fx(k_i))$$

Setelah perhitungan dari matriks $\Delta U(k_i)$ didapat hasilnya sebagai berikut:

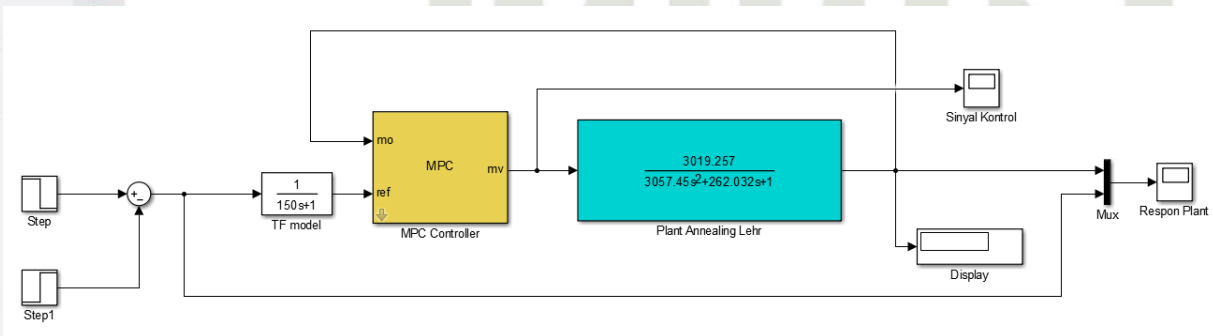
$$\Delta U(k_i) = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] [5.8728]$$

$$= 5.8728$$

Selanjutnya nilai ΔU akan masuk ke dalam *plant annealing lehr*.

Perancangan Simulasi

Pendesainan simulasi ini dimaksudkan untuk memberi gambaran pada respon sistem, perancangan sistem respon menggunakan Matlab.



Gambar 3. 4 Rangkaian *Simulink* Sistem Pengendali *Model Predictive Control* (MPC)

Seperti terlihat pada blok diagram simulink model referensi yang diinginkan mendapatkan masukan berupa sinyal *step*. Keluaran dari *plant* diharapkan dapat mengikuti keluaran dari model referensi yang diinginkan.

Skenario Penelitian

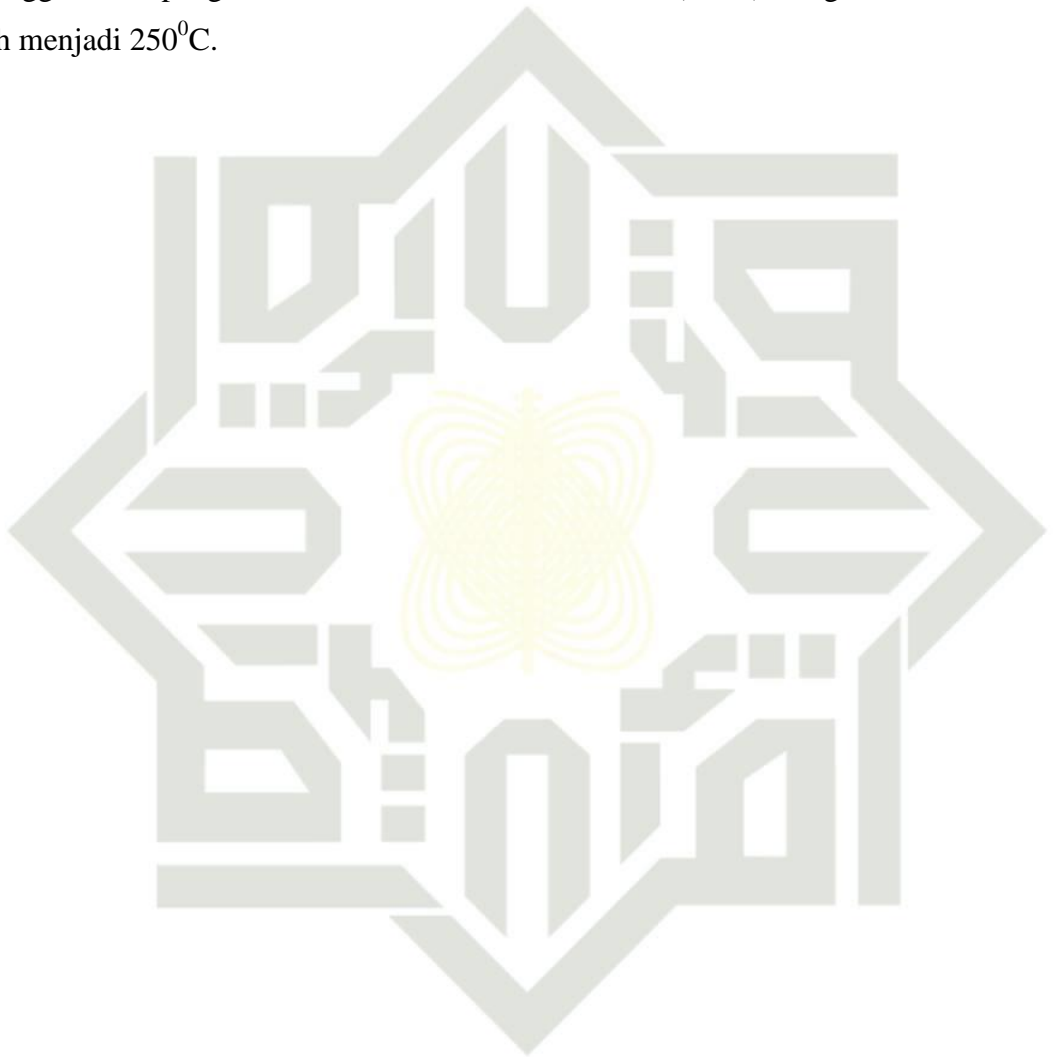
Penelitian ini menggunakan pengendali *Model Predictive Control* (MPC) untuk pengendalian temperatur pada annealing lehr dengan memasukkan data-data yang telah didapat pada pemodelan matematis dari penelitian tentang penerapan PID proses pembuatan kaca lembaran di PT. Asahimas Flat Glass, Tbk Sidoarjo untuk pengaturan pada temperatur[7] ke dalam program Matlab, berdasarkan penelitian terkait dengan *set point* 550⁰C. pada penelitian ini dilakukan beberapa pengujian dengan melihat hasil simulasi, data yang diambil yaitu respon *transient* dari pengujian tersebut. Adapun pengujian yang dilakukan yaitu:

1. Simulasi sistem secara *open loop*

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2. Pengujian dengan menggunakan *pengendali Model Predictive Control* (MPC) dengan suhu 550°C .
3. Pengujian dengan menggunakan *pengendali Model Predictive Control* (MPC) dengan suhu 250°C .
4. Pengujian menggunakan *pengendali Model Predictive Control* (MPC) dengan suhu 550°C dirubah menjadi 250°C .



UIN SUSKA RIAU

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Mudia, “*Adaptif STR-PID Untuk Pengendalian Temperatur Pada Annealing*”, Program Studi Teknik Elektro, UIN Sultan Syarif Kasim Riau, 2020.
<https://www.pmr-indonesia.org/?s=profil+industri+kaca+lembaran>“profil-industri-kaca-lembaran-2017”, Diakses tanggal 25 Juli 2020.
- [2] A. A. Hamzah, “Profil PT. ASAHIMAS FLAT GLASS Tbk”, 2020.
- [3] D. U. Utami, “*Desain Kendali LQR-PID pada Sistem Pengendalian Temperatur di Annealing Lehr Untuk Proses Pembuatan Kaca Lembaran*”, Program Studi Teknik Elektro, UIN Sultan Syarif Kasim Riau 2018.
- [4] Dkk Suparto, “*Analisa Kualitas Produk di PT. Surabaya Meka Box Ltd Dengan Metode Six Sigma Dan FMEA*”, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, 2018.
- [5] P. Meilita, I. A. Resti, and R. G. Lina, “Industri Kaca”, 2017.
- [6] Suyanto dan Miftahuddin, “*Penerapan PID Controller pada Sistem Pengendalian Temperatur pada Proses Pembuatan Kaca Lembaran di PT. Asahimas Flat Glass, Tbk Sidoarjo*”, Jurusan Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2009.
- [7] A. K. S. R. M. Solanki, “*Investigation of Fuel Saving in Annealing Lehr through Magnetic Material Fuel Saver*”, Mechanical Engineering Department, K J Institute of Engineering and Technology, Gujarat India, 2015.
- [8] K. Solihin, “*Desain Kendali Optimal Linear Quadratic Regulator (LQR) Pada Sistem Pengendalian Temperatur di Annealing Lehr Untuk Proses Pembuatan Kaca Lembaran*”, Program Studi Teknik Elektro, UIN Sultan Syarif Kasim Riau, 2017.
- [9] U. G. D. Chandrakumara, N. Sadaruwan, P. R. Dadigamuwa, dan T. S. S. Ratunnarachchi, “*Saving Energy Consumption in Glass Printing Lehr*”, Departement of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Technology, The Open University of Sri Lanka, 2016.
- [10] S. Achenef, “*Fuzzy PID Based Temperature Control of Electric Furnace for Glass Tempering Process*”, Electrical Enginering Departement, Addis Ababa University Addis Ababa Institute of Technology, 2017.

Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

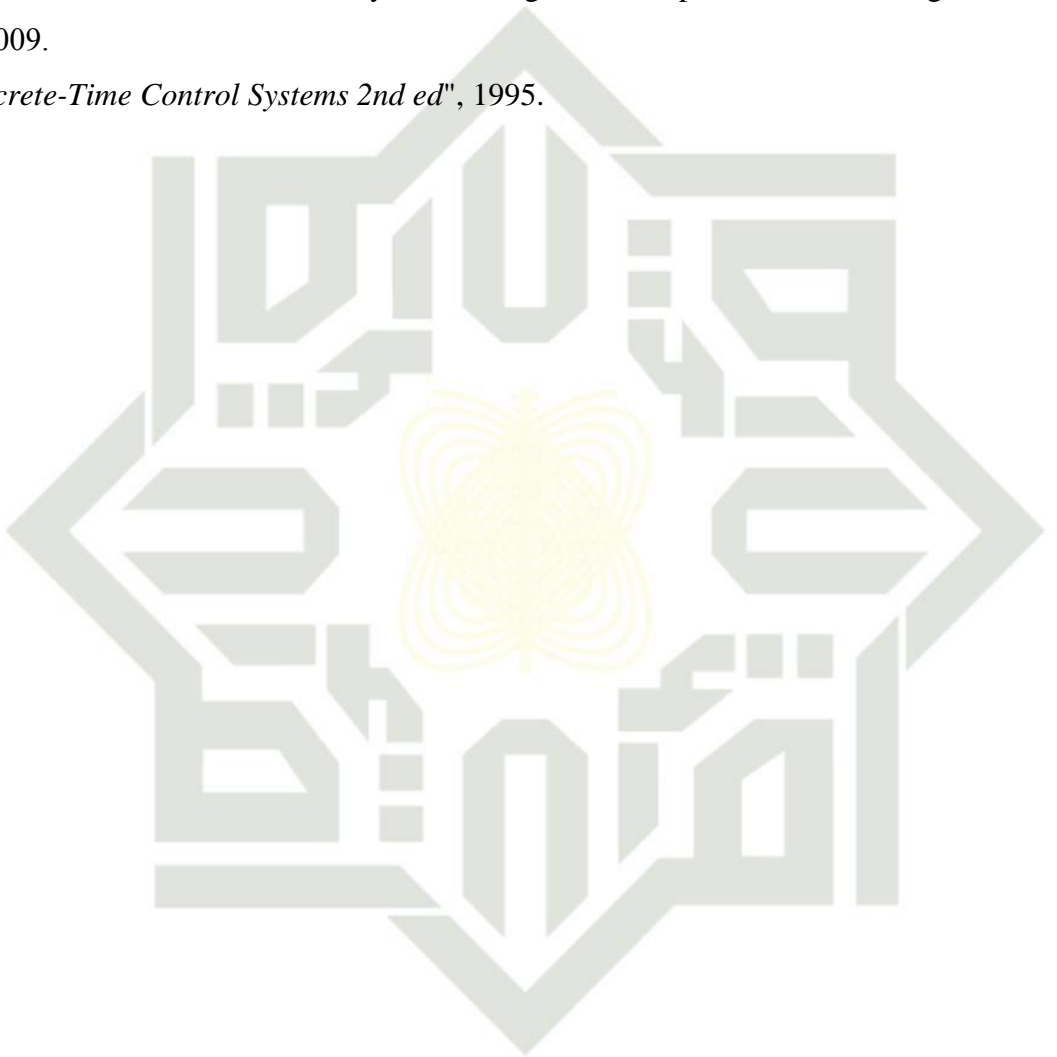
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

- [2] Dedi. Muliadi, "*Sistem Pengendalian*", Departemen Fisika, Universitas Sumatera Utara, 2016.
- [3] J. Melvin, "*Model Predictive Control dengan Coupled-Tank Basic Process Rig 38-100 Untuk Pengaturan Level Pada Coupled-Tank*", Departemen Teknik Elektro, Universitas Indonesia, 2008.
- [4] W. H. Syaifudin, "*Penerapan Model Predictive Control (MPC) pada Optimasi Portofolio Saham*", Jurusan Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2015.
- [15] M. Mallaiah, K. Rama Rao, dan C. Venkateswarlu, "*A Simulated Annealing Optimization Algorithm based Nonlinear Model Predictive Control Strategy with Application*", 2020.
- [16] Y. Al-sagheer, V. Venkataraman, and R. Steinberger-wilckens, "*Nonlinear Model Predictive Control (NMPC) for SOFC*", 2016.
- [17] E. Aggelogiannaki dan H. Sarimveis, "*A Simulated Annealing Algorithm for Prioritized Multiobjective Optimization - Implementation in an Adaptive Model Predictive Control Configuration*", 2007.
- [18] Frely, Novianti Rahayu, "*Perancangan Model Predictive Control Pada Kolom Distilasi Biner Ammonia*", Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2017.
- [19] H. Mudia, M. Rameli, "*Perancangan Model Predictive Torque Control (MPTC) Untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa*", Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2015.
- [20] I. D. Puspitarini, R. Effendie, dan J. Pramudijanto, "*Desain Pengaturan Level pada Coupled Tank Process dengan Menggunakan Metode Model Predictive Control*", Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2017.
- [21] B. Setiyo. A. Triwiyatno, "*Perancangan Model Predictive Control (MPC) pada Proses Quadruple Tank*", Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang, 2013.
- [22] Prawito, "*Analisis Pengendalian Temperatur pada Proses Pembuatan Kaca Lembaran Menggunakan Kombinasi Pengendali SMC dan PID*", Program Studi Teknik Elektro, UIN Sultan Syarif Kasim Riau, 2018.

Hak Cipta Ditindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- [3] M. Hubert, "*Lecture 9: Annealing and Tempering IMI-NFG Course on Processing in Glass*", 2015.
- [4] Nurlita Gamayanti, "*Karakteristik Sistem Orde Kedua*", 2013.
- [5] H. Iskandar, "Sistem Pengaturan Adaptif." .
- [6] Wang, "Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB." 2009.
- [7] Ogata K. "*Discrete-Time Control Systems 2nd ed*", 1995.



UIN SUSKA RIAU

LAMPIRAN

Linearization Result:

To plot the response of this result click on the node labeled Custom Views.

To export the result click on the Export To Workspace button below.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \\ a &= \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} x1 & x2 \end{array} \\ \begin{array}{c} x1 \\ x2 \end{array} & \begin{bmatrix} -0.0857 & -0.0003271 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \\ b &= \begin{array}{c} u1 \\ \begin{array}{c} x1 \\ x2 \end{array} \end{array} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ c &= \begin{array}{cc} x1 & x2 \\ y1 & \begin{bmatrix} 0 & 0.9875 \end{bmatrix} \end{array} \\ d &= \begin{array}{c} u1 \\ y1 \end{array} \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Continuous-time state-space model.

State Names:

x1 - [Plant Annealing Lehr\(1\)](#)

x2 - [Plant Annealing Lehr\(2\)](#)

Input Channel Names: u1 - [MPC Controller](#)

Output Channel Names: y1 - [Plant Annealing Lehr](#)

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Erryni Chantika Permata lahir pada tanggal 22 Maret 2000 sebagai anak terakhir dari Gusrianto dan Rini Fitri dengan jumlah saudara sebanyak 2 saudara. Beralamat di Jl. Pincuran Gaung, RT 004 RW 002, Kel. Tarok Dipo, Kota Bukittinggi, Sumatera Barat. Penulis menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 18 Tarok Dipo dan lulus pada tahun 2012, kemudian melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 2 Bukittinggi dan lulus pada tahun 2014, selanjutnya melanjutkan pendidikan ke Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 5 Bukittinggi. Kemudian setelah lulus SMA pada tahun 2017 penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Universitas Islam Negei Sultan Syarif Kasim Riau dengan jurusan Teknik Elektro. Pada semester 4 penulis mengambil konsentrasi Elektronika Instrumentasi dan lulus pada tahun 2021 dengan predikat Cum laude

Dengan karunia Allah SWT, ketekunan serta rasa motivasi yang tinggi untuk terus belajar dan berusaha, penulis telah berhasil menyelesaikan tugas akhir ini. Semoga dengan penulisan tugas akhir ini mampu memberikan manfaat dan kontribusi untuk siapa saja yang membutuhkannya.

Akhir kata penulis mengucapkan rasa syukur yang sebesar-besarnya kepada Allah SWT atas terselesaikannya tugas akhir yang berjudul “**Perancangan Kendali Model Predictive Control (MPC) Pada Pengendalian Temperatur Annealing Lehr**”.

No. HP : 089651267125

Email : 11750525088@students.uin-suska.ac.id

UIN SUSKA RIAU

© Hak cipta

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.